Tipo documento: **CAPA PROCESSO**
Evento: **abertura**

PROCESSO

Nº 5069002-52.2026.4.04.7100

Capa: **Parte 1**

Nº do processo 5069002-52.2026.4.04.7100
Classe da ação: AÇÃO CIVIL PÚBLICA
Competência Cível/Ambiental
Data de autuação: 09/10/2026 16:14:32
Subseção de origem: Porto Alegre
Situação MOVIMENTO
Órgão Julgador: Juízo C da Central de Processamento de Litígios Associados à Catástrofe Climática RS - 2024
Juiz(a): RAFAELA SANTOS MARTINS DA ROSA

Assuntos

Código	Descrição	Principal
1521	Mudanças Climáticas, DIREITO AMBIENTAL	Sim
1208	Enchentes no Rio Grande do Sul em 2024, QUESTÕES DE ALTA COMPLEXIDADE, GRANDE IMPACTO E REPERCUSSÃO	Não

Partes e Representantes

AUTOR	RÉU
MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL (26.989.715/0050-90) - Entidade	SHELL BRASIL PETROLEO LTDA (10.456.016/0001-67) - Pessoa Jurídica

Informações Adicionais

Valor da Causa:	R$ 541.036.800,00	Nível de Sigilo do Processo:	Sem Sigilo (Nível 0)	Anexos Eletrônicos:	Não há anexos
Ação Coletiva de subst. processual:	Não	Antecipação de Tutela:	Não Requerida	Criança e Adolescente:	Não
Doença Grave:	Não	Grande devedor:	Não	Opção por Juízo 100% Digital:	Não
Penhora no rosto dos autos:	Não	Penhora/apreensão de bens:	Não	Pessoa com deficiência:	Não
Pessoa com Transtorno do Espectro Autista:	Não	Pessoa enquadrada na LEI 14.289:	Não	Petição Urgente:	Não
Possui bem associado:	Não	Reconvenção:	Não	Vista Ministério Público:	Não

PÁGINA DE SEPARAÇÃO
(Gerada automaticamente pelo sistema.)

Evento 1

Evento:
DISTRIBUIDO POR SORTEIO RSPOA09F
Data:
09/10/2026 16:14:32
Usuário:
GP23402 - DIEGO BOFF - ANALISTA PROCURADORIA
Processo:
5069002-52.2026.4.04.7100/RS
Sequência Evento:
1

À CENTRAL DE PROCESSAMENTO DE LITÍGIOS ASSOCIADOS À CATÁSTROFE CLIMÁTICA RS - 2024

MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL – MPF, pelos procuradores da República signatários, no uso de suas atribuições constitucionais e legais, com fundamento no artigo 129, incisos II e III da Constituição da República Federativa do Brasil, bem como no artigo 6º, inciso VII, alínea “b” e '‘d'', inciso XIV, "g” e inciso XIX, "b” da Lei Complementar nº 75/93; e

INSTITUTO PRESERVAR, associação civil sem fins lucrativos, inscrita no CNPJ n. 05.858.859/0001-50, com sede na RS 040, Km 20, s/n, no Assentamento Sepé, interior do município de Viamão/RS, vêm, respeitosamente diante de Vossa Excelência, com fulcro no art. 1º, incisos I, III e IV da Lei n. 7.347/85, apresentar a presente

AÇÃO CIVIL PÚBLICA

em face de **SHELL BRASIL PETRÓLEO LTDA.**, pessoa jurídica de direito privado, inscrita no CNPJ n. 10.456.016/0001-67, com sede na Av. República do Chile, n. 330, no Centro do Rio de Janeiro/RJ, o que faz pelos fatos e fundamentos a seguir expostos.

13218426328

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

MPF Ministério Público Federal

instituto preservar

SUMÁRIO

1. CLASSIFICAÇÃO DO LITÍGIO..... 3
2. SÍNTESE DA DEMANDA..... 3
3. QUADRO FÁTICO..... 6
3.1. O Rio Grande do Sul no epicentro da emergência climática..... 11
3.1.1. Dos eventos extremos de setembro e novembro de 2023..... 11
3.1.2. Catástrofe climática de 2024..... 14
3.1.3. Dos eventos extremos ocorridos em 2025 e 2026..... 28
4. FUNDAMENTOS JURÍDICOS..... 31
4.1 Preliminares..... 31
4.1.1. Legitimidade ativa do Ministério Público Federal..... 31
4.1.2. Legitimidade ativa do Instituto Preservar..... 32
4.1.3. Legitimidade passiva..... 34
4.1.4. Competência da Justiça Federal..... 42
4.2. Mérito..... 45
4.2.1 Da responsabilidade civil ambiental (e climática)..... 45
4.2.2. Da responsabilidade do poluidor indireto..... 47
4.2.3. Direito humano ao clima estável e seguro..... 51
4.2.4. Dano climático enquanto dimensão do dano ambiental..... 56
4.2.4.1. Dano climático direto e indireto..... 64
4.2.5 Nexo de causalidade..... 66
4.2.5.1 Afastamento da tese da "Gota no oceano"..... 72
4.2.5.2 Nexo causal entre o aquecimento global antropogênico e os eventos climáticos extremos no sul do Brasil..... 76
4.2.5.3. Ciência da Atribuição..... 78
4.2.5.3.1 Atribuição do Aquecimento (Warming Attribution ou Trend Attribution).. 88
4.2.5.3.2 Atribuição de Fontes (Source Attribution)..... 93
4.2.5.3.3 Atribuição de Eventos (ou Atribuição de Eventos Extremos, Physical Hazard Attribution ou Physical Event Attribution)..... 97
4.2.4.3.4 Consolidação do nexo de causalidade por meio da melhor ciência disponível 106
4.2.6. Irrelevância da licitude da atividade..... 109
4.2.6.1 Inaplicabilidade das excludentes de responsabilidade: previsibilidade do evento, fortuito interno e concausalidade..... 112
4.2.7. Solidariedade e reparação proporcional dos danos materiais..... 114
4.2.8. Dano moral coletivo..... 120
4.2.9. Direito à participação informada e da Assessoria Técnica Independente (ATI) aos atingidos..... 129
4.2.10. Inversão do ônus da prova..... 133
5. DOS PEDIDOS..... 135
ROL DE DOCUMENTOS ANEXOS..... 139

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

1. CLASSIFICAÇÃO DO LITÍGIO

A presente Ação Civil Pública tem por objeto a responsabilização civil ambiental-climática da empresa ré pelos danos materiais e morais coletivos decorrentes do evento climático extremo **que atingiu o estado do Rio Grande do Sul entre abril e maio de 2024**, em razão de sua contribuição histórica e continuada para as emissões globais de Gases de Efeito Estufa (GEE) associadas à exploração, produção e comercialização de combustíveis fósseis.

Trata-se de litígio climático, subassunto processual expressamente criado pelo art. 3º, §4º, da Resolução CNJ nº 433/2021, e enquadrado entre as "questões ambientais, econômicas e sociais de alta complexidade, grande impacto e repercussão", nos termos estabelecidos pela Portaria Conjunta CNJ e CNMP nº 1/2019.

Postula-se a observância dos paradigmas hermenêuticos consolidados na I Jornada Jurídica de Prevenção e Gerenciamento de Crises Ambientais do Conselho da Justiça Federal, dentre os quais, para os fins desta demanda, destacam-se os enunciados 16, 17, 43, 63, 69, 74 e 102, os quais serão devidamente apontados ao longo da fundamentação.

2. SÍNTESE DA DEMANDA

O planeta vive hoje um "colapso socioambiental", que se caracteriza como um processo "[...] de inviabilização do projeto humano pela diminuição das condições físicas e biológicas favoráveis à continuidade das dinâmicas evolutivas da vida planetária."[1]

O 6º Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)[2] consolidou o consenso científico de que as atividades humanas,

[1] MARQUES, Luiz. **Ecocídio:** por uma (agri)cultura da vida. 1ª Ed. – São Paulo: Expressão Popular, 2025, p 23-23.
[2] Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport_PO.pdf

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

principalmente por meio das emissões de GEE, causaram, e ainda causam, inequivocamente, o aquecimento global[3], e que a intensificação do aquecimento global aumenta a **frequência** e a **intensidade** de eventos extremos – precipitações intensas, inundações e outros desastres relacionados ao clima – , com efeitos particularmente graves sobre populações em situação de vulnerabilidade.

O IPCC também reconhece que, a despeito da multiplicidade de fontes, cerca de 70% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) havidas desde o início da Revolução Industrial (1751) advêm da produção e queima de combustíveis fósseis, atividades que mais impulsionam o efeito estufa induzido pelo ser humano.

A demanda assenta-se, portanto, sob o fato de que (i) a catástrofe climática que atingiu o estado gaúcho entre abril e maio de 2024 foi agravada, em probabilidade e intensidade, pelo aquecimento global induzido pela atividade humana, (ii) a queima de combustíveis fósseis é a principal fonte de gases de efeito estufa (GEE) de origem antropogênica e a contribuição individual da ré para as emissões cumulativas globais é tecnicamente mensurável e (iii) o ordenamento jurídico autoriza a responsabilização da empresa ré, na qualidade de poluidora, uma vez que contribuiu (e contribui) para a causação de eventos climáticos extremos através da emissão de GEE[4] e, logo, pelos danos ambientais e sociais experimentados em razão do evento.

Busca-se, assim, a responsabilização da demandada, na condição de um dos principais agentes econômicos associados à acumulação histórica de GEE na atmosfera, com tríplice finalidade: **a reparação parcial dos danos já causados, a internalização dos custos ambientais-climáticos da atividade econômica poluidora e a realização das funções preventiva, pedagógica e dissuasória da responsabilidade civil ambiental**, funções que, no contexto de recorrência documentada de eventos extremos no território gaúcho, assumem relevo particular.

[3] Disponível em: https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0270467619886266?journalCode=bsta

[4] A empresa demandada figura entre os agentes econômicos globais historicamente associados à exploração, produção e comercialização de combustíveis fósseis, em escala planetária. Não bastasse, no contexto brasileiro, ocupa posição relevante no mercado de combustíveis à base de petróleo, com inserção econômica direta em setor altamente poluente.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

A demonstração do nexo causal apoia-se em acervo probatório fundado na **ciência da atribuição** – que identifica e quantifica as relações causais entre as emissões antropogênicas de GEE, o aquecimento global e a alteração da probabilidade e da intensidade de eventos climáticos extremos –, campo cuja idoneidade metodológica foi expressamente reconhecida, no ano de 2025, pela Corte Interamericana de Direitos Humanos, no Parecer Consultivo PC-32/2025, e pela Corte Internacional de Justiça, na Opinião Consultiva sobre as obrigações dos Estados em matéria de mudanças climáticas.

Considerados em conjunto, tais estudos, permitem identificar: (i) que as atividades humanas, mediante emissões de GEE, causaram o aquecimento global observado (atribuição do aquecimento); (ii) que a **contribuição individual da ré** para as emissões cumulativas globais é tecnicamente mensurável, correspondendo a aproximadamente 2% do total registrado desde 1854 (atribuição de fontes); e (iii) que o aquecimento global antropogênico tornou o evento de abril e maio de 2024 cerca de duas vezes mais provável e aproximadamente 12% mais intenso (atribuição de eventos).[5]

O dano climático constitui uma dimensão do dano ambiental e atrai a incidência do regime de responsabilidade civil ambiental objetiva, orientado pelos princípios do poluidor-pagador, da reparação integral e da solidariedade intergeracional. Nesse regime, **busca-se evitar que os ônus de atividades econômicas altamente emissoras e globalmente lucrativas sejam transferidos às vítimas e ao Poder Público,** de modo que a licitude formal da atividade econômica desenvolvida pela empresa ré não afasta sua responsabilidade pelos danos dela decorrentes.

Não se atribui, todavia, à empresa ré a responsabilidade exclusiva pelo agravamento dos eventos climáticos extremos – o que implicaria ignorar a natureza multicausal da crise climática. Embora a responsabilidade civil ambiental seja regida pela solidariedade, e os autores pudessem, por isso, demandar a integralidade do dano de qualquer corresponsável,

[5] Em primeiro lugar, a Atribuição do Aquecimento (*Warming Attribution*) permite alcançar a conclusão de que o aumento da temperatura média do planeta decorre predominantemente de emissões antropogênicas de GEE. Em segundo lugar, a Atribuição de Fontes (*Source Attribution*) permite identificar a contribuição de grandes agentes econômicos e setores emissores para o volume global e cumulativo dessas emissões. Por fim, a Atribuição de Eventos Extremos (*Physical Hazard Attribution/Physical Event Attribution*) configura ferramenta essencial para a presente demanda, porquanto possibilita uma avaliação sobre de que forma e em que medida as mudanças climáticas contribuíram para aumentar a probabilidade, a intensidade e/ou a severidade de determinado evento climático, como o que atingiu o Rio Grande do Sul.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

opta-se, como melhor especificado em tópico próprio, por postular a reparação parcial, mediante pedido de indenização proporcional.

3. QUADRO FÁTICO

O Estado do Rio Grande do Sul tem sido atingido, com intensidade e frequência crescentes, por eventos climáticos extremos que provocaram a destruição de moradias e de infraestrutura, o deslocamento forçado de populações e alterações duradouras na configuração geográfica dos territórios afetados. O quadro fático a seguir exposto demonstra que o desastre de 2024, objeto desta demanda, não constitui ocorrência isolada, mas o episódio mais grave em uma sucessão de eventos da mesma natureza.

A alteração do regime de precipitações no extremo sul do país foi antecipada pelo Poder Público federal. Documento técnico produzido pela Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, com vista à adoção de políticas no setor energético, publicado no ano de 2015 sob o título Adaptação às Mudanças do Clima: Cenários e Alternativas – Recursos Hídricos: Produto 2 – Balanço Hídrico 2010-2040[6], **previu** anomalias nos padrões das precipitações para os anos de 2011-2040, descrevendo a possibilidade de **chuvas intensas no extremo sul do país**, de acordo com diversos modelos matemáticos.

O relatório "Base Científica das Mudanças Climáticas, Volume 1 - Primeiro Relatório de Avaliação Nacional" do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, publicado em 2014, também se debruçou sobre a previsão da influência das mudanças climáticas na intensificação de precipitação na região sul do Brasil:

> Questão 1: Quais são os resultados observacionais relacionados às variações de parâmetros ambientais que podem representar efeitos da variabilidade climática natural de longo período e, em alguns casos, indicações de efeitos da ação humana?

[6] Disponível em: https://www.intercept.com.br/2024/05/06/enchentes-no-rs-leia-o-relatorio-de-2015-que-projetou-o-desastre-e-os-governos-escolheram-engavetar/pta%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A0s%20Mudan%C3%A7as%20do%20Clima:%20Cen%C3%A1rios%20e%20Alternativas%20%E2%80%93%20Recursos%20H%C3%ADdricos%20Produto%202%20%E2%80%93%20Balan%C3%A7o%20H%C3%ADdrico%202010-2040

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

[...] A tendência de aumento da precipitação entre 1950-2000 no Sul do Brasil e outras partes da baixa Bacia do Paraná/Prata, principalmente entre o período anterior e posterior à década de 1970, aparece em outros modos interdecadais, principalmente no quarto modo, sendo que esta tendência é suportada por séries um pouco mais longas.[7]
[...]
Questão 4: Como os principais processos biogeoquímicos seriam afetados pelas mudanças climáticas nos biomas e sistemas hídricos brasileiros?
[...] Regionalmente, o aumento de eventos extremos associados à frequência e volume de precipitação também é previsto. Os cenários apontam para diminuição na pluviosidade nos meses de inverno em todo país, assim como no verão no leste da Amazônia e Nordeste. Da mesma forma, a frequência de chuvas na região Nordeste e no Leste da Amazônia (Pará, parte do Amazonas, Tocantins, Maranhão) deve diminuir, com aumento na frequência de dias secos consecutivos. Este cenário deverá impor um stress sério aos já escassos recursos hídricos da região Nordeste. **Em contraste, o país deve observar o aumento da frequência e da intensidade das chuvas intensas na região subtropical (região Sul e parte do Sudeste)** e no extremo oeste de Amazônia.[8] (grifos postos)

[..]
Questão 8: Quais as mudanças climáticas projetadas para curto e longo prazo que irão afetar os principais biomas brasileiros?
[...] **MATA ATLÂNTICA:** Como este bioma abrange áreas desde o sul, sudeste até o nordeste brasileiro, as projeções apontam dois regimes distintos. Porção Nordeste (NE): Aumento relativamente baixo nas temperaturas de 0,5º a 1ºC e decréscimo nas chuvas em torno de -10% até 2040, mantendo a tendência de aquecimento entre 2º e 3ºC e diminuição pluviométrica entre -20% e -25% em meados do século (2041-2070). Para o final do século (2071-2100) esperam-se condições de aquecimento intenso (aumento de 3º a 4ºC) e diminuição entre -30% e -35% nos padrões de chuva regional. **Porção Sul/Sudeste (S/SE): Até 2040 as projeções indicam aumento relativamente baixo de temperatura entre 0,5º e 1ºC com intensificação nos padrões de chuva em torno de 5% a 10%. Em meados do século (2041-2070) continuam as tendências de aumento gradual de 1,5º a 2ºC na temperatura e de 15% a 20% nas chuvas, sendo que essas tendências acentuam-se no final do século (2071-2100) com padrões de clima entre 2,5º e 3ºC mais quente e entre 25% a 30% mais chuvoso.**

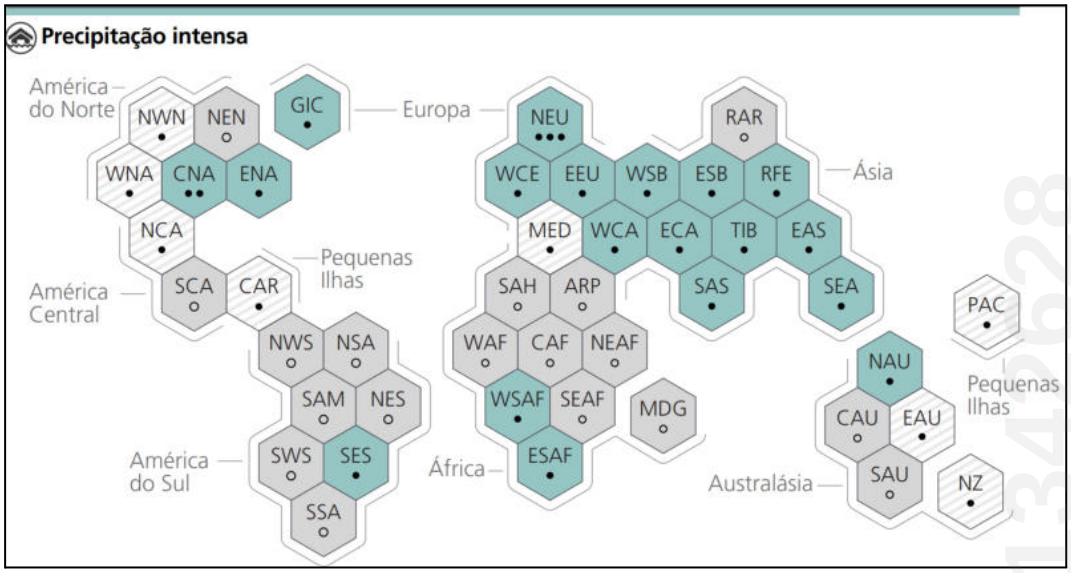
PAMPA: No período até 2040 prevalecem condições de clima regional de 5% a 10% mais chuvoso e até 1ºC mais quente, mantendo a tendência de aquecimento entre 1º e 1,5ºC e intensificação das chuvas entre 15% e 20% até meados do século (2041-2070). No final do século (2071-2100) as projeções são

[7] PBMC, 2014: Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Ambrizzi, T., Araujo, M. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464 pp. ISBN: 978-85-285-0207-7. P.10.
[8] PBMC, 2014: Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Ambrizzi, T., Araujo, M. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464 pp. ISBN: 978-85-285-0207-7. P. 14-15.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

> **mais agravantes com aumento de temperatura de 2,5º a 3ºC e chuvas de 35% a 40% acima do normal.**[9] (grifos postos)

No sexto relatório, publicado em 2021, corroborando a previsão anterior, o IPCC registrou o fato de que: (i) se observa, desde a década de 1960, um significativo aumento na precipitação média e extrema no Sudeste da América (área identificada como SES no mapa abaixo); e (ii) que **era possível asseverar, com *alta confiança,* que inundações pluviais ocorreriam com maior frequência e intensidade na região**[10].



Confirmando as informações acima, de caráter prospectivo, estudo do INPE documentou alterações efetivamente observadas nas séries históricas, confirmando as projeções formuladas uma década antes. Em validação empírica dos modelos, o **INPE concluiu que a região Sul do Brasil registrou um aumento entre 10 e 30% na precipitação média anual nas últimas décadas**:

> **Resultados** - As anomalias de precipitação acumulada são observadas nas três décadas avaliadas. Contudo destacam-se duas regiões contrastantes no período mais recente (2011 a 2020). **Os resultados indicam que os estados da região Sul e parte dos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul registraram aumento nos volumes de precipitação. No período de referência, a média anual era de 1.500**

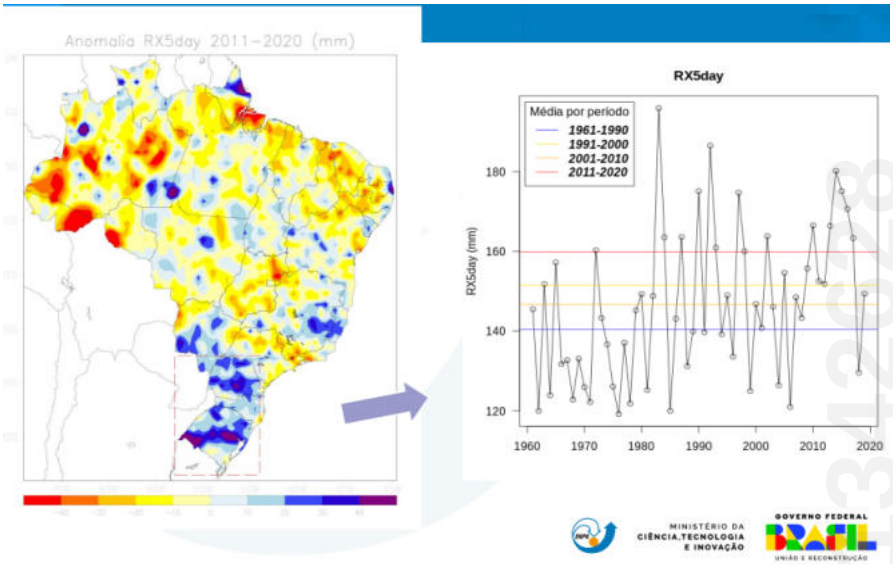
[9] PBMC, 2014: Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Ambrizzi, T., Araujo, M. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464 pp. ISBN: 978-85-285-0207-7. P. 21-22.

[10] Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport_PO.pdf p.66.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

mm, mas na década mais recente, entre 2011 e 2020, o volume chegou a 1.660 mm por ano, indicando um aumento entre 10 e 30%, a depender da região. Segundo o mapa de tendência de séries, algumas áreas pontuais no Norte do país também apresentaram aumento da precipitação.[11]

Na divulgação das análises, o INPE destacou que "a mudança do clima já está afetando extremos de tempo e clima em todas as regiões do planeta".[12] O índice RX5day – que revela a maior quantidade de chuva registrada em um período consecutivo de cinco dias –, é expressivo quanto à alteração do regime de chuvas no estado gaúcho:



No gráfico à direita, a linha azul indica o período de referência (1961-1990) e a linha vermelha a década mais recente (2011-2020). Fonte: INPE/MCTI.

As normais climatológicas[13] geradas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) relativas aos períodos de 1961-1990 e de 1991-2020[14] confirmaram que

[11] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Nas últimas três décadas, Sul registra aumento de até 30% na precipitação média anual. 13 de maio de 2024. Disponível em: https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/nas-ultimas-tres-decadas-sul-registra-aumento-de-ate-30-na-precipitacao-media-anual. Acesso: 19 jun. 2026.

[12] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Nas últimas três décadas, Sul registra aumento de até 30% na precipitação média anual. 13 de maio de 2024. Disponível em: https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/nas-ultimas-tres-decadas-sul-registra-aumento-de-ate-30-na-precipitacao-media-anual. Acesso: 19 jun. 2026.

[13] Normais climatológicas constituem valores médios de elementos climáticos (como temperatura, precipitação, etc.) calculados, de acordo com parâmetros estabelecidos pela OMM, para um período longo e contínuo, geralmente de pelo menos três décadas. Ao comparar as condições climáticas atuais e passadas, é possível compreender a variabilidade do clima ao longo do tempo.

[14] https://portal.inmet.gov.br/uploads/normais/NORMAISCLIMATOLOGICAS.pdf

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

praticamente **todas as regiões do estado do Rio Grande do Sul apresentam mudanças nessa direção, algumas delas com até 300mm de aumento na precipitação anual entre as duas trintenas**.

Na Estratégia Nacional de Adaptação do Plano Clima, o Governo Federal reconhece que "**as evidências disponíveis são claras quanto ao agravamento dos impactos negativos de alterações climáticas em todo o território nacional e em níveis mais acelerados do que as projeções indicavam"**.[15]

Constata-se, portanto, que no contexto brasileiro, e especificamente na região Sul, as projeções formuladas pelo IPCC, pelo Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), pela Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República e pelo INPE foram confirmadas pelas séries observacionais, que registraram aumento entre 10% e 30% na precipitação média anual.

A Agência Nacional de Águas (ANA) e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em análise sobre as cheias de 2023 e 2024, apontaram que "é justamente na região Sul do Brasil onde há o maior sinal de aumento de cheias em consequência da mudança climática."[16]

[15] MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. Plano Clima Adaptação - Estratégia Nacional de Adaptação. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smc/plano-clima/plano-clima-adaptacao. P. 56. Acesso: 19 jun. 2026.

[16] Paiva, R. C. D., Fan, F.M. Collischonn, W., Medeiros, M, S., Oliveira, R.C., Lima, S.G., Camargo, P., Medeiros, P.M. 2025. Caracterização e modelagem das cheias de 2023 e 2024 no Rio Grande do Sul em escala regional. Relatório Técnico. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. p. 17. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Acervo/Detalhe/111793?returnUrl=/sophia_web/Home/Index&guid=1763424002514. Acerca da questão, convém destacar que a suscetibilidade do território gaúcho decorre de fatores geomorfológicos próprios (altitudes elevadas, declividades acentuadas e solos rasos), que favorecem o escoamento rápido das águas e a elevação abrupta dos níveis fluviais em boa parte de suas bacias hidrográficas. Tais fatores, contudo, são estruturais e permanecem constantes ao longo do tempo; não explicam, por isso, a alteração recente da frequência e da magnitude dos episódios de precipitação extrema, cuja probabilidade e intensidade foram significativamente ampliadas pelo incremento antropogênico do aquecimento global.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

13213426628

3.1. O Rio Grande do Sul no epicentro da emergência climática

Confirmando os alertas científicos, os eventos extremos passaram a ocorrer no território gaúcho em intervalos cada vez menores, com efeitos cumulativos sobre populações, territórios, serviços públicos, infraestrutura, economia local e vínculos comunitários.

Em intervalo inferior a um ano, entre setembro de 2023 e maio de 2024, o estado enfrentou três das maiores enchentes de sua história. O ápice dessa sucessão de eventos ocorreu entre abril e maio de 2024, quando se consumou o **maior desastre climático já registrado no país**, o qual atingiu 96% dos municípios gaúchos (478 municípios, dentre os 496, decretaram estado de calamidade pública ou estado de emergência).

Conforme se detalhará adiante, o evento não foi um fato episódico ou fortuito, mas o mais gravoso em uma **série de eventos climáticos extremos**, cuja recorrência e magnitude vêm se intensificando em razão do aquecimento global.

3.1.1. Dos eventos extremos de setembro e novembro de 2023

Após sucessivos anos de estiagens, entre os dias 4 e 5 de setembro de 2023, o estado do Rio Grande do Sul foi assolado por precipitações extremas que resultaram na maior enchente registrada até então neste século. O evento, que atingiu diretamente a região do Vale do Taquari, afetou 359 mil pessoas, deixando 5 mil pessoas desabrigadas e 21 mil desalojadas. O saldo trágico contabilizou **54 mortes e 4 desaparecimentos**, concentrados majoritariamente na região central do estado. O Governo Estadual declarou estado de calamidade pública nos municípios atingidos[17].

A dimensão econômica do desastre, segundo levantamento da Confederação Nacional de Municípios, efetuado ainda em meio ao desastre, alcançou a cifra de 1,3 bilhão de reais, sendo 175 milhões correspondentes a danos em habitação e cerca de 3,1 milhões despendidos exclusivamente em operações de limpeza urbana e remoção de escombros.

[17] Disponível em: https://leisestaduais.com.br/rs/decreto-n-57177-2023-rio-grande-do-sul-declara-estado-de-calamidade-publica-nos-municipios-do-estado-do-rio-grande-do-sul-afetados-pelos-eventos-climaticos-de-chuvas-intensas-cobrade-1-3-2-1-4-ocorridos-entre-os-dias-2-e-6-de-setembro-de-2023

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

1321342628

Em análise técnica divulgada imediatamente após o evento, o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS) emitiu nota em que destacou:

> [...] Cheias extremas como a que ocorreu agora em setembro de 2023 já aconteceram no passado, como em 1941. Pesquisas científicas recentes baseadas em análises de séries históricas mostram que **as vazões de cheias têm aumentado nos últimos anos no sul do Brasil** (Chagas et al., 2022). Além disso, estudos conduzidos por pesquisadores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS **considerando projeções de mudanças climáticas apontam para aumento na magnitude e na frequência de cheias no estado do Rio Grande do Sul** (Brêda et al., 2023). Sendo assim, **desastres hidrometeorológicos ou hidrológicos** como os de 2023, incluindo as cheias do Taquari-Antas ou o ciclone extratropical que causou imensos prejuízos e muitas mortes em junho desse ano, **podem ocorrer novamente, seja pela variabilidade natural do clima ou pelo aumento da frequência e magnitude relacionados às mudanças climáticas, conforme as pesquisas científicas apontam**[18]**.** (grifos acrescidos ao original)

As projeções foram confirmadas **dois meses depois**. Entre os dias 19 e 23 de novembro de 2023, enquanto a população sequer havia se restabelecido da devastação anterior, mais um episódio de pluviosidade extrema assolou o território gaúcho.

Em Porto Alegre, em novembro de 2023, o Guaíba atingiu a cota de 3,46 metros, o maior nível registrado desde 1941. O evento deixou 2.653 (duas mil, seiscentas e cinquenta e três) pessoas desabrigadas e 7.527 (sete mil, quinhentas e vinte e sete) pessoas desalojadas, conforme balanço da Defesa Civil.

O rio Taquari atingiu a cota máxima de 28,94 metros, a terceira maior cota já observada[19] nos últimos cem anos, superada apenas pela de setembro de 2023 (ocorrida dois meses antes) e pela cheia histórica de 1941. Além disso, foi apenas 3 cm inferior ao mais antigo registro de enchentes na região, ocorrido em 1873, evidenciando a excepcionalidade do evento em uma perspectiva sesquicentenária.

[18] Disponível em: https://www.ufrgs.br/iph/wp-content/uploads/2023/09/Nota-sobre-a-cheia-ocorrida-nos-dias-4-e-5-de-setembro-na-Bacia-do-rio-Taquari-v2.pdf

[19] Disponível em: https://metsul.com/rio-taquari-tem-maior-terceira-cheia-dos-ultimos-cem-anos-e-inunda-o-vale/

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

13213426220

Novamente em um curto interregno, houve colapso do sistema viário, a interrupção de serviços essenciais e uma série de prejuízos socioeconômicos de magnitude semelhante a do desastre precedente.

Conforme o estudo "Marcas na paisagem: memórias para construir a resiliência no Vale do Taquari (RS)"[20], publicado pela Universidade do Vale do Taquari (Univates), o ano de 2023 constituiu marco histórico para a região do Vale do Taquari no que se refere aos registros hidrológicos:

> Conforme dados de Moraes et al. (2024), trata-se de um ano em que foram registradas **sete elevações do nível do rio Taquari acima da cota de 17 metros**. Destas, seis ultrapassaram a cota de 19 metros. Assim, 2023 e os anos de 1983 e 1984 foram os três anos com os maiores números de elevações, compreendidos entre a série histórica de 84 anos que vai de 1939 a 2023. Ainda, **2023 ficará na história porque registrou duas das quatro maiores inundações já registradas para a cidade de Lajeado**. (sem grifo no original)

Registre-se que os anos de 1983 e 1984, referidos no estudo, coincidem com um dos episódios de El Niño mais intensos já registrados (1982 e 1983), fenômeno que historicamente eleva a precipitação na região Sul. A comparação, longe de infirmar a tese ora sustentada, reforça-a. Como se demonstrará, os eventos de 2023 e 2024 ocorreram em contexto no qual **a influência do aquecimento global antropogênico superou a do próprio El Niño,** de modo que a repetição, em intervalo de poucos meses, de cotas comparáveis às de anos de El Niño excepcional evidencia justamente a alteração do regime hidrológico de base.

Os eventos de setembro e novembro de 2023 desafiaram os parâmetros hidrológicos até então estabelecidos e comprometeram a premissa de estacionariedade das séries históricas, sobre a qual se assentam, tradicionalmente, o dimensionamento de obras hidráulicas, a definição de cotas de segurança e o zoneamento de áreas de risco, exigindo revisão completa das séries de cotas máximas utilizadas em estudos técnicos e no planejamento urbano[21].

[20] Disponível em: https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/445/pdf_445.pdf
[21] Disponível em: https://www.univates.br/noticia/34993-trabalho-tecnico-estabelece-a-cheia-de-2023-como-a-maior-ja-registrada-em-lajeado-em-pelo-menos-150-anos

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

3.1.2. Catástrofe climática de 2024

Os eventos de 2023, até então sem precedentes em magnitude, foram superados em severidade cinco meses depois.

Entre os últimos dias do mês de abril e a primeira quinzena de maio de 2024, um sistema meteorológico complexo e persistente produziu volumes pluviométricos sem paralelo nos registros históricos. O desastre, marcado por precipitações torrenciais e contínuas, que se estenderam por vários dias, atingiu **96% dos municípios gaúchos** (478, dentre os 497 municípios do estado) e impactou 2,4 milhões de pessoas.

Foi o **maior desastre de natureza climática da história do país**, segundo o relatório "Estado do clima na América Latina e no Caribe", publicado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM)[22]. A extensão territorial da catástrofe alcançou quinze mil quilômetros quadrados de áreas inundadas, apresentou deslizamentos em escala inédita, com o registro de **183 mortes e 27 desaparecidos, além de 806 feridos**[23].

Foi declarado estado de calamidade pública em 95 (noventa e cinco) municípios. Também foi decretada situação de emergência em outros 323 (trezentos e vinte e três) municípios[24]. Dessa situação anormal formalmente reconhecida decorreu o acesso a instrumentos federais de resposta a desastres, conforme detalhado no item 4.1.4.

Os impactos econômicos foram espantosos. Levantamento da Confederação Nacional de Municípios estimou um impacto financeiro da ordem de R$ 13,3 bilhões. As perdas do setor privado, conforme estimado, alcançaram R$ 6 bilhões: R$ 4,9 bilhões na agricultura, R$ 514,8 milhões na pecuária, R$ 293 milhões na indústria e R$ 143,4 milhões no comércio local.[25]

---

[22] Disponível em: https://library.wmo.int/viewer/69463/download?file=WMO-1367-2024_es.pdf&type=pdf&navigator=1
[23] Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/estudo-aponta-que-enchentes-de-2024-foram-maior-desastre-natural-da-historia-do-rs-e-sugere-caminhos-para-futuro-com-eventos-extremos-mais-frequentes
[24] Disponível em: https://www.diariooficial.rs.gov.br/materia?id=1002017
[25] Disponível em: https://cnm.org.br/comunicacao/noticias/cnm-atualiza-prejuizos-dos-municipios-com-as-chuvas-no-rs-impacto-e-de-r-13-3-bilhoes

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

Os danos à infraestrutura de transporte alcançaram 250 trechos viários e 140 pontes. Mais de 20 mil veículos foram danificados, o que determinou o estabelecimento de novos parâmetros de cobertura securitária em todo o país. O aeroporto Salgado Filho, principal terminal aéreo do estado, ficou fechado por cerca de seis meses, impactando severamente a economia regional e a conectividade logística.[26]

A barragem da Usina Hidrelétrica (UHE) 14 de Julho, localizada em Cotiporã/RS, rompeu-se parcialmente em vista da superação do aumento da vazão do rio das Antas acima de todos os parâmetros do projeto. Por sua vez, a UHE Castro Alves teve a casa de máquinas invadida pela força das águas e teve suas operações paralisadas por dias.

A gravidade dos danos à infraestrutura hidrelétrica foi documentada no Laudo Técnico nº 225/2025 ANPEA/SPPEA/PGR (anexo), subscrito pelos analistas Felipe Eugenio de O. V. Sampaio e Valter Giugno Abruzzi, peritos em engenharia civil e integrantes da Secretaria de Perícia, Pesquisa e Análise (SPPEA) da Procuradoria-Geral da República:

> 8. **As chuvas intensas que atingiram o estado do Rio Grande do Sul no início de maio de 2024 alcançaram níveis proporcionais àquelas ocorridas em setembro e novembro de 2023. No entanto, pelas características das inundações observadas, causou mais devastação do que as anteriores.**
> 9. A região da serra nordeste do estado, principalmente as áreas marginais aos vales do Rio das Antas e do Rio Taquari sofreu mudanças no visual das encostas, nas construções às margens dos cursos d'água, nas rodovias, tanto federais, como estaduais e vicinais, no leito dos rios.
> 10. As barragens situadas no Rio das Antas, fortemente atingidas pelo volume excepcional de água, foram aquelas pertencentes às usinas da Ceran: UHE Castro Alves, UHE Monte Claro e UHE 14 de Julho.
> 11. Na apresentação realizada no primeiro dia das vistorias, os prepostos da Ceran detalharam os eventos e motivos que levaram ao rompimento parcial da barragem da UHE 14 de julho. Em resumo tem-se que o rompimento parcial da barragem ocorreu pela impossibilidade de se realizar a abertura total das comportas durante o período mais crítico da cheia de maio de 2024, o que elevou o nível d'água de montante para acima do máximo de projeto (máximo maximorum), gerando forças/pressões não previstas e, consequentemente, o rompimento parcial da barragem.
> 12. De acordo com a Ceran, no dia 01/05/2024, ocorreu a perda de alimentação/energia, posteriormente confirmada como sendo causada pela queda de uma das torres da linha de transmissão da UHE 14 de Julho.
> Assim, os comandos de abertura das comportas do vertedouro da barragem da UHE 14 de Julho passaram a não responder. Diante da impossibilidade de abrir as

[26] Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/apos-cinco-meses-fechado-aeroporto-de-porto-alegre-retoma-operacao-comercial-nesta-segunda-feira/

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

comportas remotamente, uma equipe de manutenção foi enviada a pé, mas não conseguiu acessar a barragem da UHE 14 de Julho, em ambas as margens, devido a deslizamentos de taludes, o que impediu o acesso à sala do vertedouro para realizar a abertura manual das comportas.

13. Na sequência, ainda segundo a Ceran, foram iniciadas conversas com as Defesas Civis e órgãos governamentais para disponibilização de helicóptero para acessar da sala do vertedouro da UHE 14 de Julho e realizar a abertura local das comportas. Contudo devido às condições meteorológicas adversas, nenhuma aeronave decolava na região, permanecendo assim até a ocorrência do rompimento parcial do trecho superior da soleira vertente da barragem, às 13h23 do dia 02/05/2024. Por fim, somente em 03/05/2024, a equipe da Ceran conseguiu acessar a sala do vertedouro da barragem da UHE 14 de Julho e iniciar a abertura das comportas.

As fotografias abaixo documentam a extensão dos danos causados à estrutura da UHE 14 de Julho:





13213426628

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

O laudo pericial destaca que a magnitude da cheia superou os parâmetros de projeto de estruturas de engenharia dimensionadas segundo as séries hidrológicas historicamente disponíveis.

No setor habitacional, os prejuízos chegaram a R$ 4,7 bilhões, afetando 113,6 mil unidades residenciais. A infraestrutura do setor público contabilizou R$ 2,6 bilhões em danos, e houve a interrupção de serviços essenciais, como abastecimento de água e fornecimento de energia elétrica, transporte e educação.[27]

Segundo informações da Secretaria Estadual de Educação (Seduc), 542 escolas estaduais foram atingidas, e algumas delas demandaram reconstrução total. Na rede municipal, levantamento da União dos Dirigentes Municipais de Educação (Undime-RS) apontou que 644 escolas foram severamente atingidas em 124 municípios, comprometendo o atendimento a cerca de 123 mil estudantes.[28]

Em avaliação acerca dos impactos das enchentes e inundações sobre a produção, o PIB e o emprego, o Data Research & Insights (DRI), da Universidade de Passo Fundo (Montoya et al., 2024)[29], quantificou os impactos macroeconômicos da catástrofe sobre a economia gaúcha.

O estudo identificou perdas de R$ 35,61 bilhões na produção total (contração de 2,61%):

[27] Disponível em: https://cnm.org.br/comunicacao/noticias/cnm-atualiza-prejuizos-dos-municipios-com-as-chuvas-no-rs-impacto-e-de-r-13-3-bilhoes

[28] Disponível em: https://www.brasildefato.com.br/2025/07/05/apos-o-maior-desastre-climatico-escolas-do-rs-ainda-lutam-para-se-reconstruir/

[29] Disponível em: https://www.upf.br//_uploads/Conteudo/Relat%C3%B3rio%20Executivo%20DRI-%20UPF-%20impactos%20das%20enchentes%20na%20economia%20RS.pdf

13213426628

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

Tabela 2: Síntese dos impactos das enchentes e inundações sobre o Valor Bruto da Produção dos agregados setoriais do RS para o ano de 2024 – em milhões de reais

Agregados setoriais	Valor Bruto da Produção 2023		Output Impactos em 2024			
			Distribuição dos impactos no Valor Bruto da Produção			Total Valor Bruto da Produção
	Valores (A)	Participação relativa (percentual)	Valores (B)	Participação relativa (percentual)	Variação Percentual (B) / (A)	Valores (C) = (A) – (B)
Agropecuária	103.850	7,60	-4.410	12,38	-4,25	99.440
Indústria	584.920	42,83	-13.472	37,83	-2,30	571.448
Serviços	676.818	49,56	-17.733	49,79	-2,62	659.085
Total	1.365.588	100,00	-35.614	100,00	-2,61	1.329.974

Estimativa de redução de 15,74 bilhões (retração de 2,46%) no Produto Interno Bruto (PIB):

Tabela 5: Síntese dos impactos das enchentes e das inundações sobre o Valor Adicionado dos agregados setoriais do RS para o ano de 2024 - em milhões de reais

Agregados setoriais	Valor adicionado 2023		Output Impactos em 2024			
			Distribuição dos impactos no Valor Adicionado			Total Valor Adicionado
	Valores (A)	Participação relativa (percentual)	Valores (B)	Participação relativa (percentual)	Variação percentual (B) / (A)	Valores (C) = (A) – (B)
Agropecuária	60.054	9,38	-2.466	15,66	-4,11	57.588
Indústria	148.713	23,23	-2.807	17,83	-1,89	145.906
Serviços	431.532	67,40	-10.471	66,51	-2,43	421.061
Total	640.299	100,00	-15.744	100,00	-2,46	624.555

E a eliminação de 152.017 postos formais de trabalho (queda de 2,35%):

Tabela 8: Síntese dos impactos da enchente sobre o Emprego dos agregados setoriais do RS para o ano de 2024 – em números de trabalhadores

Agregados setoriais	Emprego 2023		Output Impactos em 2024			
			Distribuição dos impactos no emprego			Total emprego
	Número de trabalhadores (A)	Participação relativa (percentual)	Número de trabalhadores (B)	Participação relativa (percentual)	Variação percentual (B) / (A)	Número de trabalhadores (C) = (A) – (B)
Agropecuária	236.561	3,66	-9.552	6,28%	-4,04%	227.009
Indústria	1.837.473	28,47	-29.089	19,14%	-1,58%	1.808.384
Serviços	4.381.137	67,87	-113.376	74,58%	-2,59%	4.267.761
Total	6.455.172	100,00	-152.017	1,00	-2,35%	6.303.155

A análise setorial revelou que o setor de serviços concentrou a maior parte das perdas totais do PIB, com 66,51% (28,18% referente ao comércio), e de empregos eliminados, com 67,87% (43,96% referente ao comércio). A agropecuária, embora com participação menor em termos absolutos, apresentou a maior contração relativa na produção (- 4,25%).

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

O estudo demonstrou, ainda, a propagação sistêmica dos danos por meio de efeitos multiplicadores: cada R$ 1 milhão em perdas diretas reduziu a renda estadual em R$ 2,25 milhões, enquanto cada posto de trabalho diretamente eliminado gerou 2,1 desempregados no sistema econômico.

Em novembro de 2024, também foi publicado relatório conjunto produzido por Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL) e Grupo Banco Mundial, elaborado com base em uma metodologia internacionalmente consagrada para Avaliação de Danos e Perdas (DaLA, na sigla em inglês) de desastres, desenvolvida pela CEPAL. O estudo estima em R$ 88,9 bilhões os efeitos das cheias no Rio Grande do Sul 2024, dos quais 69% (R$ 61 bilhões) correspondem ao setor produtivo, 21% em setores sociais (R$ 19 bilhões); 8% à infraestrutura (R$ 7 bilhões); e 1,8% ao meio ambiente (R$ 1,6 bilhão)[30], assim discriminados:

QUADRO 3: EFEITOS DO DESASTRE POR SETOR, EM MILHARES DE REAIS

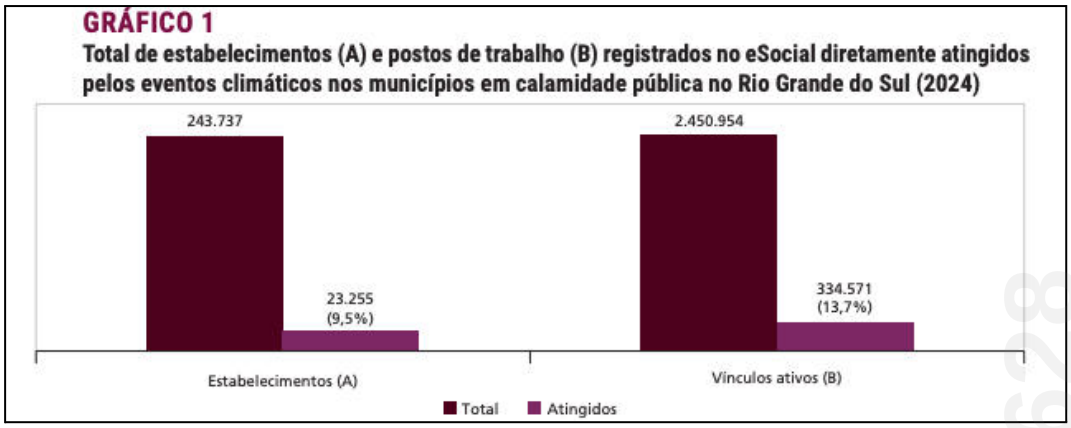
	Danos	Perdas	Custos adicionais
Social	11.605.088	1.033.007	6.405.756
Educação	2.466.408	475.966	106.958
Saúde	999.115	336.337	194.650
Cultura e bens culturais	148.710	48.122	23.132
Habitação	7990855	172.582	809.047
População afetada			5.271.969
Infraestrutura	4.449.312	1.013.196	1.538.109
Água potável e saneamento	439.852	306.827	276.327
Transportes	2.967.764	378.088	763.894
Setor elétrico	1.041.696	328.281	497.887
Produtivo	25.222.141	3.0474.606	5.537.702
Agricultura	498.573	8.579.014	3.650.223
Alojamento e restaurantes	1.917.397	4.753.889	88.200
Comércio	14.839.651	9.504.508	682.624
Pecuária	709.573	1.191.017	782.835
Indústria	7.256.947	6.446.177	333.820
Meio ambiente	11.836	1.585.882	
Total	41.288.377	34.106.691	13.481.567

Fonte: Equipe DaLA, 2024

[30] Disponível em: https://publications.iadb.org/pt/publications/portuguese/viewer/Avaliac%C3%A3o-dos-efeitos-e-impactos-das-inundac%C3%B5es-no-Rio-Grande-do-Sul.pdf

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

A Nota Técnica "Uma Estimativa de empresas e postos de trabalho diretamente atingidos pelas enchentes do Rio Grande do Sul em 2024"[31], elaborada pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) estimou que, nos municípios em estado de calamidade ou de emergência, o impacto foi ainda maior e ao menos 334,6 mil postos de trabalho foram diretamente atingidos:



O lago Guaíba permaneceu acima da cota de inundação de 2 de maio a 1º de junho de 2024, mantendo extensas áreas da capital gaúcha submersas **por um mês inteiro**, duração sem precedentes em uma metrópole brasileira.

Os impactos psicossociais foram alarmantes. Estudo conduzido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e pelo Hospital de Clínicas de Porto Alegre (HCPA) aponta que, em virtude do desastre, 53% dos participantes apresentaram sintomas de depressão, 51,9% de ansiedades variáveis e 44,3% de Transtorno de Estresse Pós-Traumático.

As repercussões educacionais projetaram-se no índice de abstenção ao Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM) de 2024: 48,6% dos estudantes do Rio Grande do Sul não compareceram ao Exame Nacional do Ensino Médio (Enem)[32], quase o dobro da média nacional, no ano de 2024.

Apenas em Porto Alegre, mais de 160 mil pessoas foram diretamente afetadas pelas enchentes, que impactaram serviços, comércio, indústria e a infraestrutura de fornecimento de

[31] Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/64d2bf43-16b7-46be-b255-9c3b877a6091/content
[32] Disponível em: https://gauchazh.clicrbs.com.br/educacao/enem/noticia/2024/11/rio-grande-do-sul-tem-o-maior-percentual-de-abstencao-do-pais-nos-dois-dias-de-provas-do-enem-cm3d4q8hk001l01fkfaamp913.html

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

água e energia elétrica[33]. Bairros como o Sarandi, na zona norte, e o Arquipélago, que compreende as ilhas do delta do Jacuí, foram as regiões mais afetadas.

O município de Eldorado do Sul, situado na região metropolitana, foi o mais afetado proporcionalmente, com cerca de 81% dos domicílios atingidos pela água e aproximadamente 32 mil pessoas impactadas diretamente pelo evento climático extremo[34]. Em vista disso, cerca de 80% da população beneficiária do programa Compra Assistida na localidade optou por imóveis fora do município, em razão do receio da ocorrência de novas enchentes[35].

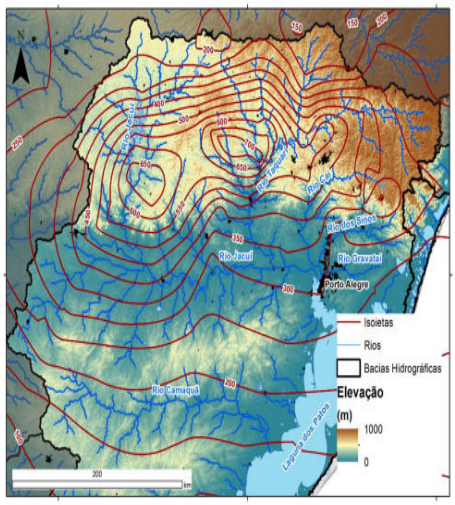
A região do Vale do Taquari concentrou parcela expressiva dos danos. Dos quinze municípios que tiveram percentualmente maior população atingida, sete localizam-se no Vale do Taquari: Estrela, Roca Sales, Muçum, Arroio do Meio, Encantado, Cruzeiro do Sul e Lajeado[36].

De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), em diagnóstico técnico-científico oficial[37], o desastre de 2024 foi causado pela **maior chuva já observada no país**:

> O desastre de 2024 foi causado por chuvas com uma combinação de magnitude, duração, intensidade e abrangência espacial que jamais foi observada no Brasil (Collischonn et al., 2024a). Essas chuvas caíram justamente nas regiões mais elevadas, declivosas e com solos mais rasos da bacia hidrográfica da Lagoa dos Patos, produzindo altos volumes de escoamento. Mapa do volume de chuva acumulada no período de 5 dias entre 28 de abril e 02 de maio de 2024, onde cada linha vermelha representa uma isoleta (linha sobre a qual os valores de chuva são constantes) de precipitação de 50 em 50 mm. Fonte: Collischonn et al., 2024a

[33] Disponível em: https://gis-smamus.portoalegre.rs.gov.br/portal/apps/dashboards/cc9a1fcb70ac404aa577989354c31b5c
[34] Disponível em: https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2024/05/eldorado-do-sul-foi-a-cidade-mais-afetada-pela-enchente-com-808-dos-domicilios-atingidos-clwttubax004q013ufsx8wazp.html
[35] Disponível em: https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2026/04/28/exodo-bairros-fantasmas-eldorado-do-sul-reconstruir-dois-anos-apos-enchente-rs.ghtml
[36] Disponível em: https://storymaps.arcgis.com/stories/a81d69f4bccf42989609e3fe64d8ef48
[37] Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/VisualizadorPdf?codigoArquivo=171447&tipoMidia=0

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161



Mapa do volume de chuva acumulada no período de 5 dias entre 28 de abril e 02 de maio de 2024, onde cada linha vermelha representa uma isoieta (linha sobre a qual os valores de chuva são constantes) de precipitação de 50 em 50 mm.
Fonte: Collischonn *et al.*, 2024a

> Os acumulados de chuva superaram 700 mm na parte norte do estado. Em alguns casos (por exemplo, chuva de 3 dias em 10.000 km2), a precipitação de 2024 foi 47% maior que o recorde anterior de precipitação. (...)

A estação pluviométrica localizada no município de Muçum exemplifica a magnitude do evento: entre 25 de abril e 15 de maio registrou **1.062 mm de precipitação**, volume que representa **8 vezes a média isolada para abril (126,2 mm) ou para maio (137,6 mm)**, demonstrando a anomalia pluviométrica sem precedentes na série histórica.

Além da extensão da área inundada, superior aos eventos que a precederam no ano anterior, um elevado número de deslizamentos de terra foi registrado em todo o Rio Grande do Sul. Mapeamento com imagens de satélite de alta resolução identificou 15.087 deslizamentos de terra entre 30 de abril e 6 de maio de 2024 no estado gaúcho. Uma área de 63 mil km², em 130 municípios distintos, foi atingida por movimentos de massa, os quais resultaram no óbito de 67 pessoas[38].

[38] Cicatrizes de deslizamentos e rios mais rasos aumentam a vulnerabilidade do RS às chuvas: Revista Pesquisa Fapesp

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161



Cicatrizes nos morros próximos à ponte Ernesto Dornelles, sobre o rio das Antas, na serra gaúcha, entre os municípios de Bento Gonçalves e Veranópolis. Foto: Herideva Egas/CEMADEN



Mercado no bairro Fátima, Muçum. Foto: Maycon Dartora (Maio, 2024)



Interdição de parte das residências e da rua do Centro da cidade de Cruzeiro do Sul por risco de deslizamento. Detalhe da linha pintada torta (ao centro da imagem). Foto: Sofia Kich (Maio, 2024)

De acordo com um estudo publicado na revista científica *Landslides*[39], as cicatrizes de deslizamento concentraram-se predominantemente em áreas de encosta da porção centro-nordeste do Rio Grande do Sul. Entretanto, mesmo regiões que não ostentavam registros de movimentos de massa no passado experimentaram ruptura em seu perfil de riscos geotécnicos em 2024. Em alguns municípios, o relato dos atingidos era o de que não havia zona segura para refúgio, uma vez que as áreas de salvamento utilizadas como proteção

[39] Egas, H.M., Stabile, R.A., de Andrade, M.R.M. *et al.* Comprehensive inventory and initial assessment of landslides triggered by autumn 2024 rainfall in Rio Grande do Sul, Brazil. *Landslides* 22, 579–589 (2025). https://doi.org/10.1007/s10346-024-02410-w

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

contra as inundações encontravam-se próximas a encostas sujeitas a deslizamentos, em virtude do alto nível de saturação hídrica do solo.

Para além dos impactos socioeconômicos e de ordem humanitária, o desastre provocou danos sem precedentes aos ecossistemas, às margens dos cursos d'água e matas ciliares, danos que constituem, em si, lesão ao macrobem ambiental tutelado pelo art. 225 da Constituição.

Décadas de esforços de conservação foram obliterados em questão de dias. A força das águas suprimiu 2.805 hectares de vegetação nativa, o que levou o Estado à terceira posição nacional em desmatamento no bioma Mata Atlântica[40]. O Atlas da Mata Atlântica[41], publicado pela Fundação SOS Mata Atlântica e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), aponta que o desmatamento no estado saltou de 52 hectares suprimidos no período 2022-2023 para 1.602 hectares em 2023-2024, o que representa um aumento de quase 3.000%. O relatório indica que o principal vetor da perda de cobertura vegetal no bioma foi a ocorrência de deslizamentos de encostas, causados pelas chuvas extremas de maio de 2024 no estado gaúcho.[42]

Em alguns municípios gaúchos, a supressão da vegetação, decorrente tanto do arraste quanto da submersão prolongada, converteu áreas ripárias em taludes verticalizados, com perda da função de contenção das margens e aumento da suscetibilidade a novos processos erosivos, conforme se observa na imagem a seguir:

[40] Disponível em: https://alerta.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/17/2025/11/RAD2024_28_10.pdf
[41] Disponível em: https://www.sosma.org.br/sobre/relatorios-e-balancos
[42] Atlas da Mata Atlantica 2023-2024. pp. 5-6. Disponível em: https://www.sosma.org.br/sobre/relatorios-e-balancos Acesso em julho de 2025.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161



Cheia dos rios no Rio Grande do Sul destruiu vegetação das margens - *Vitor Shimomura/Brasil de Fato*

A desestabilização ecológica das margens fluviais favoreceu a fixação de espécies exóticas invasoras, que ocuparam o espaço das plantas nativas, criando barreiras biológicas à regeneração natural. Diversas espécies invasoras foram identificadas, e um especial esforço no sentido de promover a revegetação de tais áreas com espécies nativas tem sido indicado por especialistas como essencial ao restabelecimento da mata ciliar e de suas funções ecossistêmicas, dentre as quais, a de atenuar os efeitos das próximas cheias. Configura-se, assim, dano ambiental de natureza continuada: a perda da vegetação ripária compromete a capacidade de resposta do território aos eventos extremos subsequentes, ampliando a extensão dos danos futuros.

Estudos florísticos conduzidos pela equipe do Laboratório de Botânica da Univates antes das inundações documentaram que as margens do rio Taquari, do rio Forqueta e do arroio Forquetinha abrigavam 523 espécies vegetais, 455 espécies nativas e 68 exóticas[43]. Essa amostra dá conta da possível perda de biodiversidade que adveio em razão do evento.

[43] Disponível em: https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/445/pdf_445.pdf. Acesso em 27.07.2025. pp. 128.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

Os impactos sobre a fauna seguiram a mesma direção. Animais que dependem de nichos específicos, como aqueles que habitam as margens dos rios ou as florestas ribeirinhas, tiveram seu *locus* de vida e reprodução sensivelmente alterado, comprometendo a viabilidade populacional de médio e longo prazo, afetando espécies endêmicas e a biodiversidade, até mesmo diante da inserção de espécies exóticas (como peixes criados em cativeiro que foram levados pelas chuvas)[44]. Assim, impactos aos ecossistemas ribeirinhos, ainda não completamente mensurados, integram a miríade de prejuízos experimentados em virtude do evento.

O evento produziu, ainda, perda expressiva de fertilidade do solo.[45] Em vista da erosão severa, da deposição de sedimentos e da contaminação por substâncias orgânicas e inorgânicas, estima-se que o evento de abril/maio de 2024 tenha afetado cerca de **3,2 milhões de hectares**.[46] Análises espaciais conduzidas pela Secretaria de Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação (Seapi) indicam ainda que, para a recuperação do solo impactado, seria necessário um investimento da ordem de **6,6 bilhões de reais**[47].

Na serra gaúcha, região de cultivo de frutas e hortaliças, estudo concluiu pela necessidade de um interregno compreendido entre 14 e 40 anos para que o solo possa voltar a deter a produtividade que ostentava antes do evento, indicando que 85% do estoque de carbono existente foi perdido, componente fundamental para a estruturação, fertilidade e capacidade de retenção hídrica dos solos.[48] Trata-se, portanto, de degradação que se projeta por décadas, configurando dano interino juridicamente autônomo.

Os impactos sobre a segurança alimentar também foram quantificados. No relatório da Organização Meteorológica Mundial (OMM), sobre o Estado do clima na América Latina e no Caribe 2024, destacou-se perdas agrícolas estimadas "*en 8 500 millones de reales*

[44] Disponível em: https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/445/pdf_445.pdf. pp. 66-70.
[45] Nesse sentido: https://www.ufsm.br/2025/03/27/analises-de-solo-em-areas-de-deslizamentos-mostram-consequencias-das-enchentes-no-rs; https://admin.estado.rs.gov.br/upload/arquivos/202407/orientacoes-para-recuperacao-do-solo-gaucho-nota-tecnica-1-1-1.pdf
[46] Disponível em: https://agricultura.rs.gov.br/painel-apresenta-diagnostico-do-impacto-das-enchentes-nos-solos-do-rs
[47] Idem. Ibidem.
[48] Disponível em https://agenciabrasil.ebc.com.br/meio-ambiente/noticia/2025-03/apos-enchentes-serra-gaucha-pode-levar-40-anos-para-recuperar-o-solo

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

brasileños; la soja fue el cultivo más perjudicado, dado que constituía entre el 15 % y el 16 % de la superficie agrícola cosechable del estado. Un total de 600 000 hectáreas de pastos resultaron gravemente dañadas y generaron pérdidas para el sector ganadero valoradas en 1 200 millones de reales".[49]

Verificaram-se, ainda, consequências sanitárias diretas. Segundo levantamentos realizados, o Rio Grande do Sul foi a única unidade da federação do país que teve aumento no número de casos registrados de leptospirose entre os anos de 2023 e 2024. Somente no ano de 2023, o Rio Grande do Sul registrou 461 casos de leptospirose, enquanto, em 2024, marcado pela enchente no estado, esse número subiu para 550, o que representou um aumento de 19,3% no número de casos[50].

Para os grupos socialmente vulnerabilizados (populações periféricas, idosos, pessoas com deficiência, comunidades tradicionais etc.), o desastre produziu uma ruptura irreversível em seu modo de vida, em vista da perda de amigos e parentes, do desfazimento de laços sociais, afetivos e laborais construídos ao longo de gerações. À semelhança do que vivenciam nações insulares do Oceano Pacífico[51], ameaçadas pelo aumento do nível do mar, e obrigadas a deixar seus lares e seus vínculos sociais em razão das mudanças climáticas induzidas pela ação humana, o **deslocamento forçado de mais de 600 mil pessoas**, no auge do evento, evidencia a dimensão humana dos desastres climáticos, cujos efeitos recaem de modo desproporcional sobre quem menos contribuiu para a sua causação, assimetria expressamente reconhecida pelo IPCC, que registra serem as comunidades vulneráveis, historicamente menos responsáveis pelas emissões, as afetadas de forma desproporcional (alta confiança).

Em resposta à tragédia, **a <u>União destinou 111,6 bilhões de reais ao estado</u>**[52] para ações de recuperação da infraestrutura das cidades, estímulo da economia local (empresários,

[49] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Avaliação dos efeitos e impactos das inundações no Rio Grande do Sul, novembro 2024; CEPAL, 2024. https://www.cepal.org/pt-br/publicacoes/81035-avaliacao-efeitos-impactos-inundacoes-riograndе-sulrio-sul-novembro-2024

[50] Disponível em: https://www.nexus.fsb.com.br/estudos-divulgados/casos-de-leptospirose-tem-aumento-de-19-no-rio-grande-do-sul-entre-2023-e-2024-ano-marcado-pela-enchente-no-estado/

[51] A exemplo de Tuvalu, Vanuatu, Maldivas etc.

[52] Disponível em: https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2025/04/destinacao-de-r-111-6-bilhoes-e-grande-mobilizacao-reconstrucao-do-rs-contou-com-acoes-emergenciais-e-estruturantes-do-governo-federal

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

indústria, serviços, trabalhadores autônomos), repasse direto às famílias e aquisição de moradias.

Passados mais de dois anos, ainda há pessoas em moradias provisórias. A persistência do quadro evidencia que os efeitos do desastre não se exauriram com a fase emergencial, configurando dano de natureza continuada.

3.1.3. Dos eventos extremos ocorridos em 2025 e 2026

A sucessão de eventos catastróficos acima descrita não configura anomalia episódica, mas indicativa de um novo padrão climático que expõe o Rio Grande do Sul a inundações e deslizamentos com frequência e intensidade crescentes. Os eventos ocorridos em 2025 e 2026, adiante examinados, confirmam essa tendência.

Em 2025, segundo dados do Atlas Digital de Desastres no Brasil, os eventos de ordem hidrológica tornaram a provocar prejuízos humanos e materiais. Em janeiro, maio, junho, julho, agosto e novembro, foram registrados óbitos e desalojamentos por efeito da ação da pluviosidade extrema. Em junho de 2025, 132 municípios gaúchos foram atingidos por intensas precipitações[53], que desalojaram 6 mil pessoas e causaram a morte de quatro. Múltiplos rios superaram cotas de inundação, reafirmando que a variabilidade climática natural não mais explica a frequência e intensidade dos eventos observados.

Mais uma vez, o sistema de defesa civil foi mobilizado com a necessária emissão de alertas de risco, a ativação de planos de contingência e a remoção preventiva de moradores. Rodovias, pontes, obras de arte e moradias que ainda aguardavam ações de reconstrução em razão dos eventos anteriores voltaram a ser atingidas.

A Nota Técnica intitulada “Eventos Extremos em Junho de 2025 no Brasil”[54], publicada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), registrou que os maiores volumes de chuva ocorreram nas porções central e noroeste do Rio Grande do Sul, alguns deles **registrando o dobro e, em algumas localidades, o triplo das precipitações esperadas para o mês**.

[53] Disponível em: https://apublica.org/2025/06/chuvas-no-rio-grande-do-sul-nivel-de-rios-preocupa-no-estado/
[54] Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/notasTecnicas#

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

No ano de 2026, no período compreendido até 29 de setembro de 2026, conforme relatório gerencial extraído do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC, a partir de dados constantes dos formulários de informações do desastre (FIDE), constantes da plataforma S2iD, já foram homologados, pelo Ministério da Integração e Desenvolvimento Regional, **295 reconhecimentos de calamidade pública e estado de emergência solicitados por municípios gaúchos**[55].

Nos dias 20 e 21 de setembro de 2026, ventos fortes e chuvas intensas causaram deslizamentos e danos em diferentes regiões do território gaúcho. Seis mortes foram registradas (quatro em Caxias do Sul, uma em Pelotas e uma em Charqueadas[56]) e 151 municípios foram afetados. Em preparação ao evento, a Defesa Civil estadual emitiu 75 alertas - 65 alertas SMS e 10 alertas mandatórios (*cell broadcast),* reservados para casos extremos[57].

Pouquíssimos dias depois, a partir de 25 de setembro de 2026, novo quadro de precipitação intensa afetou 47 municípios. Quatro pessoas ficaram feridas[58].

As mudanças no padrão de precipitação e os impactos socioeconômicos sobre o território[59] compõem, portanto, uma realidade inequívoca, a qual mantém o Rio Grande do Sul sob **risco sistemático de novas tragédias ambientais**[60].

Do quadro fático exposto, tem-se que:

---

[55] Disponível em: https://s2id.mi.gov.br/. Acessível mediante login e senha previamente cadastrados.
[56] Disponível em: https://www.rdliberdade.com.br/sobe-de-4-para-6-o-numero-de-mortos-pelos-temporais-desta-semana-no-rs/
[57] Disponível em: https://www.defesacivil.rs.gov.br/temporais-provocam-quatro-mortes-e-danos-em-151-municipios-do-rio-grande-do-sul
[58] Disponível em: https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2026/09/28/temporais-deixam-4-feridos-e-afetam-mais-de-12-mil-pessoas-no-rs-estado-tem-alerta-para-ciclone-veja-previsao-do-tempo.ghtml
[59] Kotz, M., Levermann, A. & Wenz, L. The effect of rainfall changes on economic production. *Nature* 601, 223–227 (2022). https://doi.org/10.1038/s41586-021-04283-8
[60] O risco é agravado pela possível consolidação de novo episódio de El Niño em 2026/2027, sobretudo em um cenário no qual o oceano está ainda mais aquecido e que se conjuga a sistemas atmosféricos persistentes. Embora a magnitude exata dos impactos somente possa ser determinada em escalas temporais mais próximas, a informação atualmente disponível é preocupante, pois o fenômeno tem o condão de elevar substancialmente o risco de chuva excessiva, cheias de rios e inundações, justamente em um Estado ainda em processo de reconstrução. Disponível em: https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/cemaden-emite-nota-tecnica-sobre-o-el-nino-2026-2027; https://portal.inmet.gov.br/noticias/el-ni%C3%B1o-o-que-esperar-e-como-isso-pode-afetar-o-rio-grande-do-sul

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

(i) o Rio Grande do Sul foi atingido, entre setembro de 2023 e maio de 2024, por três dos maiores eventos hidrológicos de sua história, e voltou a sofrer eventos extremos em 2025 e 2026, com reconhecimentos federais em volume equivalente a metade do verificado no desastre de 2024;

(ii) o evento de abril e maio de 2024 decorreu de precipitações cuja combinação de magnitude, duração, intensidade e abrangência jamais fora observada no país, conforme diagnóstico da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, e constituiu o maior desastre de natureza climática já registrado no Brasil, segundo a Organização Meteorológica Mundial;

(iii) o evento produziu danos humanos, patrimoniais, econômicos, sanitários e ambientais de extensão documentada, entre os quais mortes, deslocamento forçado de população, destruição de infraestrutura, supressão de vegetação nativa, degradação de solos e de ecossistemas ripários, com efeitos que persistem mais de dois anos após sua ocorrência;

(iv) a alteração do regime de precipitações na região era objeto de projeção científica e oficial anterior ao evento, e superou os parâmetros hidrológicos historicamente utilizados no dimensionamento de obras e no planejamento territorial;

(v) a recorrência dos eventos, sua ocorrência em fases distintas do ciclo ENOS e sua concentração geográfica no território gaúcho afastam a explicação exclusiva pela variabilidade climática natural e os danos serão ainda maiores à medida que sucessivos desastres ocorrem[61].

Abaixo, examina-se o regime jurídico aplicável a tais fatos.

[61] Disponível em: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac1d0b

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

4. FUNDAMENTOS JURÍDICOS

4.1 Preliminares

4.1.1. Legitimidade ativa do Ministério Público Federal

O art. 127 da Constituição da República define o Ministério Público como instituição permanente, essencial à função jurisdicional do Estado, incumbido de defender a ordem jurídica, o regime democrático e os interesses sociais e individuais indisponíveis.

A atuação do Ministério Público, no presente caso, busca assegurar os direitos difusos e coletivos daqueles que foram vitimados, direta ou indiretamente, em razão dos desastres climáticos em questão (art. 129, III, da CRFB), e se insere no desdobramento de diversas outras medidas já adotadas com relação às inundações de 2024, dentre as quais, a ACP nº 5001898-69.2024.4.04.7114 (ACP estrutural proposta em face da União, do estado do Rio Grande do Sul e de 9 municípios do Vale do Taquari, a fim de promover a prevenção a novos desastres), a ACP nº 5031247-91.2026.4.04.7100 (voltada a obrigar a União à regulamentação do Fundo Nacional para Calamidades Públicas) e a ACP nº 5020526-80.2026.4.04.7100 (proposta contra União e estado do Rio Grande do Sul, visando à implementação do cadastro nacional de que trata o art. 3º-A da Lei nº 12.340/2010). Referidas ações tramitam junto à Central de Processamento de Litígios Associados à Catástrofe Climática, e igualmente decorrem da necessidade de adequação do território gaúcho e do próprio arcabouço nacional à nova realidade climática.

Registre-se que as ações referidas não guardam relação de conexão ou continência com a presente demanda, dela se distinguindo quanto às partes, ao pedido e à natureza da tutela pretendida: enquanto aquelas veiculam obrigações de fazer dirigidas a entes públicos, voltadas à prevenção e à adequação de políticas públicas, a presente ação tem por objeto a responsabilização civil de agente econômico privado por danos que lhe são atribuíveis. A menção àquelas demandas destina-se, tão somente, a demonstrar a coerência e a abrangência da atuação institucional do Ministério Público Federal diante do evento.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

A legitimidade ativa do Ministério Público Federal, ademais, advém diretamente do interesse da União, à qual compete a coordenação e o planejamento contra calamidades públicas (art. 21, XVIII, da CRFB). O Poder Público federal mobilizou e segue mobilizando, nos termos do que estabelece o art. 6º da Lei nº 12.608/2012, medidas de preparação, resposta e recuperação das áreas afetadas, que abrangem desde ações de atenção à saúde mental até a elaboração de cartas geotécnicas e repasses destinados a obras estruturais.

Ainda, conforme explicitado no item 4.1.4, além de inúmeros imóveis que integram o patrimônio federal haverem sido atingidos, bem como os serviços públicos correspondentes, a União destinou ao estado, em resposta à tragédia, recursos da ordem de 111,6 bilhões de reais[62].

4.1.2. Legitimidade ativa do Instituto Preservar

A Lei da Ação Civil Pública (Lei n. 7.347/85) instituiu o principal mecanismo para a tutela dos direitos difusos e coletivos, entre os quais o meio ambiente ecologicamente equilibrado. A Ação Civil Pública apresenta-se como ferramenta mais adequada para o resguardo do ambiente para as presentes e futuras gerações, assim como para a efetivação do disposto no art. 225 da Constituição.

Nos termos do art. 5º, V, Lei n. 7.347/85, tem legitimidade para propor Ação Civil Pública a associação civil sem fins lucrativos que, concomitantemente, esteja constituída há pelo menos um ano e inclua, entre as suas finalidades institucionais, a proteção ao patrimônio público e social, ao meio ambiente, dentre outros.

No caso do Instituto Preservar, trata-se de associação civil sem fins lucrativos constituída no ano de 2003, conforme documento anexo. Ou seja, trata-se de associação com mais duas décadas de atuação nas questões socioambientais.

[62] Disponível em: https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2025/04/destinacao-de-r-111-6-bilhoes-e-grande-mobilizacao-reconstrucao-do-rs-contou-com-acoes-emergenciais-e-estruturantes-do-governo-federal

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

Ainda, é importante destacar que constam como objetivos da Associação, a defesa e proteção do meio ambiente, conforme se denota da leitura do art. 2º de seu estatuto. Destaca-se:

> Art. 2º O INSTITUTO PRESERVAR tem por objetivos:
> I - Atuar na defesa, preservação e conservação do meio ambiente, incentivar a agroecologia e promover a visão sistêmica da produção e o desenvolvimento sustentável..
> [...]

Assim, verifica-se que as finalidades estatutárias do Instituto Preservar guardam pertinência direta com o objeto da presente demanda. Sua trajetória de mais de duas décadas na defesa dos direitos socioambientais compreende, inclusive, a atuação em demandas de litigância climática, voltadas à proteção do meio ambiente e dos direitos das populações afetadas pelas mudanças climáticas.

Nesse campo, destaca-se a atuação na Ação Civil Pública n. 5030786-95.2021.4.04.7100, relativa ao licenciamento ambiental da Usina Termelétrica Nova Seival, referente a demanda que questionou a regularidade do procedimento de licenciamento e dos estudos ambientais do empreendimento, abrangendo a consideração do componente climático e a garantia de participação das comunidades potencialmente afetadas.

O Instituto Preservar também move a Ação Civil Pública n. 5050920-75.2023.4.04.7100, de natureza climática e estrutural, que aborda os impactos socioambientais e climáticos da geração de energia por termelétricas movidas a carvão mineral no Rio Grande do Sul, com especial atenção à UTE Candiota III. Entre as questões submetidas à apreciação judicial estão a implementação das políticas nacional e estadual sobre mudanças climáticas, a elaboração de um Plano de Transição Energética Justa, a incorporação do componente climático ao licenciamento ambiental e a participação social nos processos de decisão.

Essas demandas, ambas com tramitação perante o Tribunal Regional Federal da 4ª Região, demonstram a experiência concreta da entidade na defesa judicial de direitos relacionados à emergência climática. Tal histórico reforça a pertinência temática entre suas finalidades institucionais e o objeto da presente demanda, evidenciando que a proteção pretendida integra seu campo de atuação. Dessa forma, considerada também sua constituição

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

desde 2003, encontram-se preenchidos os requisitos de legitimidade ativa previstos no art. 5º, V, alíneas "a" e "b", da Lei nº 7.347/85.

4.1.3. Legitimidade passiva

O dano climático resulta da acumulação histórica de emissões e da contribuição concorrente de múltiplos agentes econômicos, o que impõe, na delimitação do polo passivo, critério metodológico compatível com a natureza global, difusa e cumulativa das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Esse item demonstra que a escolha da demandada não foi arbitrária, mas resultado da aplicação de critérios técnicos e jurídicos objetivos.

A comunidade científica internacional identificou a centralidade das grandes emissoras de carbono (c*arbon majors*, em inglês) na atuação dos maiores agentes econômicos que atuam globalmente nas atividades de petróleo, gás natural, carvão e cimento com participação individual igual ou superior a 1% das emissões globais de CO2 acumuladas.

Segundo o *Carbon Majors Database*[63], apenas 122 empresas integrantes do setor do Petróleo e Gás Natural (O&G) concentram cerca de 72% das emissões cumulativas globais de GEE[64].

Nos termos do art. 14, § 1º, da Lei nº 6.938/1981 (Política Nacional do Meio Ambiente – PNMA), a responsabilidade civil por dano ambiental é objetiva, independe de demonstração de culpa e bastando, para sua configuração, o dano e o nexo de causalidade juridicamente relevante entre a atividade desenvolvida e a degradação ambiental.

A mesma lei define poluidor como a pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado, responsável, direta ou indiretamente, por atividade causadora de degradação ambiental (art. 3º, IV).

[63] A plataforma *Carbon Majors* constitui referência técnica para identificação dos grandes agentes econômicos historicamente associados à exploração, produção e comercialização de combustíveis fósseis e às correspondentes emissões acumuladas globais de GEE. A metodologia da plataforma permite individualizar, em termos históricos e proporcionais, a contribuição de grandes grupos corporativos para a concentração acumulada de GEE na atmosfera.
[64] Disponível em: https://carbonmajors.org/briefing/The-Carbon-Majors-Database-26913

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

O conceito legal de poluidor, portanto, não se limita ao agente que pratica diretamente o ato material emissor, alcançando também quem participa, organiza, financia, integra, viabiliza, beneficia-se ou se omite diante de atividade econômica causadora de degradação ambiental.

A demandada enquadra-se, cumulativamente, nas duas dimensões do conceito legal de poluidor.

É poluidora **direta** porque explora, produz e comercializa combustíveis fósseis em território nacional figurando como a segunda maior produtora do mercado brasileiro de exploração e produção, com emissões operacionais próprias.

É poluidora **indireta** porque integra a cadeia de valor do petróleo e gás natural, beneficia-se economicamente das atividades desenvolvidas pelo grupo econômico global, atua sob diretrizes, políticas, padrões tecnológicos e estratégias corporativas internacionais, e contribui para a manutenção e expansão do modelo de negócios intensivo em carbono que sustenta as emissões globais do grupo.

Qualquer das duas qualificações é, por si, suficiente à legitimação passiva, nos termos do art. 3º, IV, da Lei nº 6.938/1981.

O Superior Tribunal de Justiça (STJ) consolidou compreensão ampla do nexo de causalidade ambiental. No emblemático REsp nº 650.728/SC, de relatoria do ministro Herman Benjamin, a Corte reconheceu que, para fins de apuração do nexo causal em dano ambiental, equiparam-se, para fins de nexo causal ambiental, quem realiza a atividade e quem dela se beneficia:

> PROCESSUAL CIVIL E AMBIENTAL. [...] DANO AMBIENTAL. RESPONSABILIDADE CIVIL OBJETIVA. OBRIGAÇÃO PROPTER REM. NEXO DE CAUSALIDADE. [...] ART. 14, § 1º, DA LEI 6.938/1981.
> [...]
> 13. **Para o fim de apuração do nexo de causalidade no dano ambiental, equiparam-se quem faz, quem não faz quando deveria fazer, quem deixa fazer, quem não se importa que façam, quem financia para que façam, e quem se beneficia quando outros fazem.**
> 14. Constatado o nexo causal entre a ação e a omissão das recorrentes com o dano ambiental em questão, surge, objetivamente, o dever de promover a recuperação da

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

> área afetada e indenizar eventuais danos remanescentes, na forma do art. 14, § 1º, da Lei 6.938/81.[65] (grifo nosso)

Se, para fins de nexo causal ambiental, equiparam-se "quem faz" e "quem se beneficia quando outros fazem", a subsidiária brasileira responde a duplo título: por sua própria atividade de exploração e produção em território nacional e por integrar a cadeia econômica de valor do grupo global, sob cuja marca, diretrizes e estratégia corporativa, participa da exploração econômica do setor de petróleo e gás natural e aufere benefícios da atividade emissora.

Se o ordenamento jurídico ambiental responsabiliza aquele que se beneficia quando outros fazem, com igual razão responsabiliza quem, além de se beneficiar, exerce a mesma atividade em território nacional.

A responsabilidade civil ambiental é solidária o que permite aos autores demandar qualquer dos corresponsáveis, isolada ou conjuntamente, sem litisconsórcio necessário.

A delimitação do polo passivo é, portanto, faculdade processual do autor, insuscetível de controle quanto à conveniência da escolha. Ainda assim, e por transparência metodológica, registra-se que a eleição da demandada observou critérios objetivos e cumulativos, a seguir explicitados:

a) a contribuição individual identificável, mensurável e juridicamente relevante da ré, enquanto integrante do grupo econômico global, para as emissões acumuladas e globais de GEE, identificada a partir da base *Carbon Majors* como responsável por aproximadamente 2,02% de todas as emissões de CO2 provenientes de combustíveis fósseis e cimento contabilizadas desde 1854, e da literatura técnico-científica sobre responsabilidade climática corporativa;

b) a existência de pessoa jurídica constituída pelas leis brasileiras, integrante do grupo econômico global, com atuação no setor de petróleo e gás natural;

c) a presença relevante da empresa no mercado nacional, demonstrada por sua atuação estruturada, contínua e economicamente expressiva no Brasil,

[65] REsp n. 650.728/SC, relator Ministro Herman Benjamin, Segunda Turma, julgado em 23/10/2007, DJe de 2/12/2009.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

13213426728

inclusive como a segunda maior empresa do setor em termos de produção de petróleo[66].

d) a assimetria entre o território em que se apropriam os resultados econômicos da atividade e o território que suporta os danos dela decorrentes, na medida em que a demandada integra grupo econômico sediado no exterior, para onde são revertidos os lucros auferidos com a exploração e a comercialização de combustíveis fósseis, ao passo que os custos ambientais e sociais do agravamento dos eventos climáticos extremos recaem sobre a coletividade brasileira.

Não se ignora que outros agentes econômicos preenchem, isolada ou parcialmente, os critérios acima. A solidariedade que rege a responsabilidade civil ambiental, contudo, dispensa o litisconsórcio passivo e faculta ao autor demandar qualquer dos corresponsáveis, sem que a ausência dos demais constitua óbice processual ou implique renúncia à sua responsabilização. A presente ação não exaure, portanto, a responsabilidade dos demais emissores, tampouco impede o ajuizamento de demandas autônomas em face deles posteriormente.

A ré integra grupo econômico global identificado pela base *Carbon Majors*[67] como uma das maiores empresas associadas a emissões cumulativas das emissões de CO2 provenientes de combustíveis fósseis e cimento contabilizadas desde 1854, ocupando a nona posição no *ranking* geral das entidades avaliadas e a sétima entre as empresas. Sua contribuição individual para alteração do sistema climático global é tecnicamente identificável, mensurável e juridicamente relevante.

A ré é pessoa jurídica constituída segundo as leis brasileiras, com personalidade jurídica própria, sede no país e atuação regular no território nacional. Sujeita-se, por isso, à jurisdição brasileira. A existência de estrutura empresarial local, permanente e economicamente organizada demonstra que a atuação do grupo no país não é abstrata nem

[66] Disponível em: https://g1.globo.com/economia/noticia/2026/07/01/quem-mais-produz-petroleo-no-brasil-veja-o-ranking-das-empresas-apos-producao-ficar-perto-de-novo-recorde.ghtml
[67] Disponível em: https://carbonmajors.org.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

remota. Cumpre esclarecer que a responsabilidade ora imputada é **própria** da demandada, e não derivada da personalidade jurídica da controladora estrangeira.

A ré detém presença relevante no mercado brasileiro de petróleo e gás natural. Conforme dados técnicos e setoriais já indicados, a empresa é a segunda maior produtora de petróleo no Brasil. Sua atuação no país não é marginal, episódica ou meramente formal, mas integra de modo expressivo a estratégia econômica do grupo global no território nacional, beneficiando-se da marca, da tecnologia, das economias de escala, da capacidade financeira, do *know-how*, da reputação corporativa e do poder de mercado do conglomerado internacional.

Por fim, considerou-se a assimetria entre o local de apropriação do resultado econômico da atividade e o local que suporta os custos ambientais. A demandada integra conglomerado sediado no exterior, tendo o grupo apurado, nos últimos cinco anos, lucros da ordem de US$ 120 bilhões em âmbito mundial[68], com parcela significativa decorrente da exploração no Brasil. Entretanto, os resultados econômicos dessa atividade são, em última instância, apropriados fora do território nacional, ao passo que os danos decorrentes do agravamento dos eventos climáticos extremos recaíram sobre a população, o meio ambiente e o erário brasileiros.

Trata-se da externalidade que o princípio do poluidor-pagador se destina a corrigir. O princípio impõe aos agentes econômicos a internalização dos custos externos à dinâmica de investimentos de sua atividade privada, evitando-se a privatização de lucros e a socialização de perdas. A assimetria territorial aqui verificada representa a forma mais acentuada dessa distorção: os lucros internalizam-se no exterior e as perdas socializam-se no Brasil.

Essa consideração encontra amparo, ainda, no princípio das responsabilidades comuns porém diferenciadas, incorporado ao direito interno pelo art. 3º da Lei nº 12.187/2009 e que alicerçam o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris e reconhecem que as contribuições à crise climática são distintas entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, e que, em termos financeiros, a distribuição do ônus climático deve observar esse aporte desproporcional. Embora concebido para orientar obrigações entre Estados, o princípio expressa juízo de equidade que informa a interpretação do regime

[68] Disponível em: https://www.macrotrends.net/stocks/charts/SHEL/shell/net-income

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

13213128628

nacional de responsabilidade civil ambiental, e que se reflete no reconhecimento, pelo IPCC, de que as comunidades que historicamente menos contribuem para a alteração do sistema climático são desproporcionalmente afetadas por seus efeitos.

Registre-se, ainda, que o critério não se funda na nacionalidade da demandada nem lhe atribui tratamento discriminatório por origem do capital. O elemento juridicamente relevante não é a origem estrangeira da empresa, mas a circunstância objetiva de que o resultado econômico da atividade emissora não permanece vinculado ao território que suporta o dano.

A integração da demandada à estratégia global do grupo é reconhecida por ela própria. Em sua comunicação institucional, a ré apresenta-se como "uma empresa global de energia, com atuação em mais de 70 países"[69], descrição que evidencia não operar como empreendimento autônomo de âmbito nacional, mas como unidade de conglomerado internacional integrado, cuja cadeia de valor abrange a exploração, a produção e a comercialização de petróleo e gás natural.

A empresa dispõe de cartilha de "Princípios Empresariais Gerais da Shell"[70], que, conforme a própria demandada, "norteiam a condução dos negócios de cada uma das companhias que integram o Grupo Shell"[71].

Adota, ainda, o *Shell Performance Framework* (SPF)[72], que se apresenta como a estrutura de governança corporativa global instituída pela controladora Shell plc, que uniformiza os padrões operacionais e normativos de todas as subsidiárias do grupo, **incluindo a Shell Brasil**. O SPF funciona como um grande "guarda-chuva" operacional e normativo, que integra os valores éticos às práticas de gestão de riscos e metas financeiras da empresa.

---

[69] Disponível em: https://www.shell.com.br/sobre-a-shell.html

[70] A cartilha da subsidiária nacional é tradução da *Shell General Business Principles* (SGBP), disponível em: https://www.shell.com/investors/environmental-social-and-governance/_jcr_content/root/main/section/simple_913716519/list_1995953506/list_item_copy.multi.stream/1653370653970/6b4a23c6d8b47b0fd3e8e3b9fe955e59431f9c83/shell-general-business-principles-2014.pdf

[71] Disponível em: https://www.shell.com.br/about-us/_jcr_content/root/main/section_1726544072/promo.multi.stream/1678362623735/c12b06a14998ddf9a68f53e7dadbf88c64e50232/sgbp-portuguese-2014-new.pdf

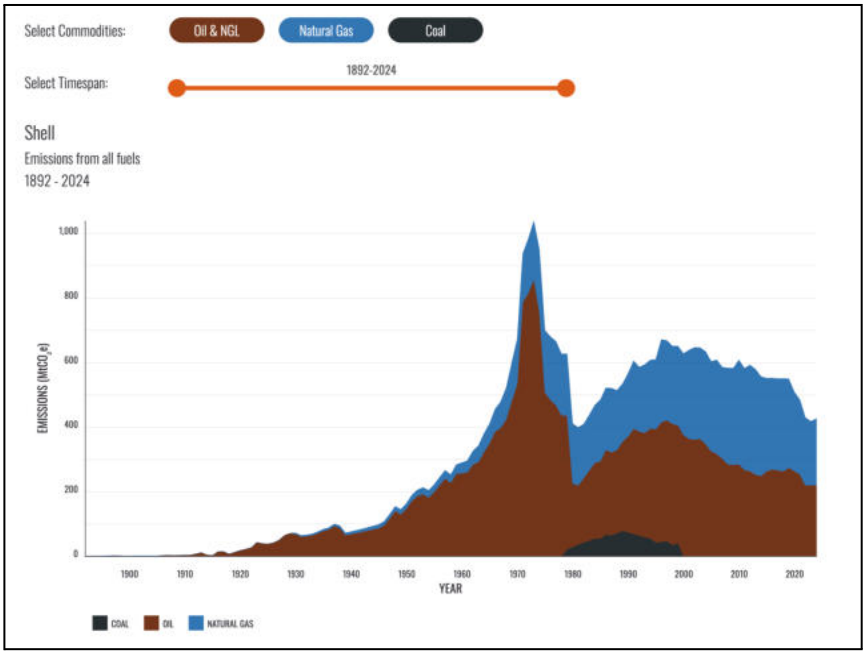
[72] O SPF serve como o veículo técnico que traduz a filosofia da empresa em processos diários, exigindo que todas as unidades de negócios incorporem de forma obrigatória os Princípios Gerais de Negócios (SGBP) e o Código de Conduta da Shell. Disponível em: https://www.shell.com/sustainability/our-approach/commitments-policies-and-standards.html

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

Tais instrumentos demonstram que as decisões estratégicas relativas ao modelo de negócios, ao perfil de investimentos e à gestão de riscos climáticos não são tomadas de forma autônoma pela subsidiária, mas emanam da controladora e vinculam obrigatoriamente todas as unidades do grupo. A ré não é, portanto, agente econômico independente que apenas coincide em marca com o conglomerado, mas sim unidade operacional integrada, que executa no território brasileiro estratégia corporativa definida globalmente e da qual aufere os benefícios econômicos correspondentes.

Em outras palavras, o SPF serve como o veículo técnico que traduz a filosofia da empresa em processos diários, exigindo que todas as unidades de negócios incorporem de forma obrigatória os Princípios Empresariais Gerais da Shell (SGBP) e o Código de Conduta da Shell.

Por fim, e não menos importante, convém destacar que o volume histórico de produção da demandada repercute diretamente em sua participação nas emissões acumuladas. Segundo a base *Carbon Majors*, a Shell ocupa a **9º posição entre as entidade avaliadas, a 7ª entre as empresas privadas**, sendo responsável, somente ela, por mais de 2% das emissões acumuladas de CO2 provenientes de combustíveis fósseis e cimento no mundo[73], conforme demonstrado:



[73] Disponível em: https://carbonmajors.org/Entity/Shell-152

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

13213126928

Fonte: Carbon Majors https://carbonmajors.org/Entity/Shell-152

Ainda que a demandada não tenha emitido diretamente, em território nacional, a totalidade dos gases de efeito estufa atribuídos ao grupo econômico, é fato que o regime da responsabilidade civil ambiental admite a imputação a agentes que, ainda que não sejam os únicos nem os causadores materiais exclusivos da degradação, integrem a cadeia causal e econômica do dano, dela se beneficiem ou concorram para sua perpetuação.

Ademais, as emissões próprias da ré, decorrentes de sua atividade de exploração e produção no país não são insignificantes. O grupo atua no Brasil desde 1912, inicialmente em atividades de distribuição e revenda de combustíveis. Após a flexibilização do monopólio estatal, promovida pela Lei nº 9.478/1997, a Shell tornou-se, em agosto de 2003, a primeira companhia internacional a produzir petróleo em escala comercial no país, nos campos de Bijupira e Salema, na Bacia de Campos, em 2003[74]. Desde então, ampliou continuamente sua atuação com participação em campos das bacias de Campos, Santos e Barreirinhas, incluindo ativos do pré-sal[75].

A participação da empresa no mercado reflete atuação contínua, integrada, significativa do ponto de vista causal, e por meio da qual as decisões corporativas da controladora estrangeira influenciam e impactam diretamente o mercado brasileiro de óleo e gás natural.

Nos últimos cinco anos, o grupo apurou lucros da ordem de aproximadamente 120 bilhões de dólares em âmbito mundial. Embora não divulgue de forma segregada o resultado, o lucro obtido através de sua subsidiária brasileira é sabidamente significativo e elevado.[76]

A Shell não foi, portanto, alçada à posição de ré de forma arbitrária, exemplificativa ou simbólica. A delimitação subjetiva da demanda observou os quatro critérios acima expostos, cumulativamente preenchidos, o que é juridicamente suficiente à luz da solidariedade que rege a responsabilidade civil ambiental.

---

[74] A produção dos campos foi encerrada após aproximadamente 20 anos de operação, período em que somaram uma produção total de 141 milhões de barris de petróleo, tendo atingido, nos primeiros anos, um pico de produção de 68 mil barris de petróleo equivalente por dia (boe/d).
[75] Disponível em: https://www.shell.com.br/sobre-a-shell/nossos-negocios/exploracao-e-producao.html
[76] Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br/infra/shell-lucra-us-984-bi-no-2o-trimestre-e-tem-producao-recorde-no-brasil/

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

4.1.4. Competência da Justiça Federal

As hipóteses de competência da Justiça Federal são expressas e taxativamente previstas no art. 109 da Constituição, interessando ao caso a do inciso I, que atribui aos juízes federais o processamento e julgamento das causas em que a União, entidade autárquica ou empresa pública federal forem interessadas na condição de autoras, rés, assistentes ou oponentes.

A presente ação civil pública é ajuizada pelo Ministério Público Federal e pelo Instituto de Direito Coletivo e tem por objeto a responsabilização da ré Shell pelos danos ambientais e climáticos decorrentes dos eventos climáticos extremos que atingiram o Estado do Rio Grande do Sul.

O Ministério Público Federal, não obstante dotado de autonomia funcional, administrativa e orçamentária, integra a estrutura da União, como ramo do Ministério Público da União. Sendo assim, apenas a Justiça Federal está constitucionalmente habilitada a proferir decisão que o vincule.

Trata-se de entendimento reiteradamente reafirmado pelo Superior Tribunal de Justiça:

> AMBIENTAL, PROCESSUAL CIVIL E ADMINISTRATIVO. ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE. INDENIZAÇÃO POR CONSTRUÇÃO IRREGULAR. MINISTÉRIO PÚBLICO. IBAMA. PODER FISCALIZATÓRIO. POSSIBILIDADE. COMPETÊNCIA COMUM. AÇÃO CIVIL PÚBLICA. **LEGITIMIDADE ATIVA AD CAUSAM**. EXISTÊNCIA. PRECEDENTES.
> 1. Cuida-se de inconformismo com acórdão do Tribunal de origem que, ao apreciar Apelações em Ação Civil Pública, manteve a sentença que declarou extinto o processo sem resolução do mérito, por reconhecer a ilegitimidade ativa do Ministério Público Federal e do Ibama para promover a responsabilização do demandado por dano ambiental em decorrência de construção de barraca de praia em Área de Preservação Permanente.
> [...]
> 4. **Em matéria de Ação Civil Pública Ambiental, a dominialidade da área em que o dano ou o risco de dano se manifesta (mar, terreno de marinha, manguezal ou Unidade de Conservação de propriedade da União, p. ex) é apenas um dos critérios definidores da legitimidade para agir do *Parquet* federal. Não é porque a degradação ambiental se deu em imóvel privado ou afeta *res communis ominium* que se afasta, categoricamente, o interesse do MPF**.
> [...]

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

10213428628

5. Recursos Especiais do Ibama e do MPF providos[77]. (grifos nossos)

Em matéria ambiental, a dominialidade da área em que se manifesta o dano ou o risco de dano ambiental é apenas um dos critérios possíveis para aferição do interesse federal, de modo que a competência da Justiça Federal não se restringe às hipóteses em que o dano recai diretamente sobre bem federal, mas alcança também situações nas quais interesses e serviços federais são diretamente afetados, como no caso em comento.

Cumpre esclarecer que o interesse federal aqui invocado não é de natureza meramente econômica, mas jurídica, pois decorre da titularidade de bens diretamente atingidos, da prestação de serviços públicos federais interrompidos e do exercício de competência constitucional própria da União, a quem incumbe planejar e promover a defesa permanente contra as calamidades públicas (art. 21, XVIII, da Constituição Federal).

A competência da Justiça Federal assenta-se em dois fundamentos autônomos e cumulativos. O primeiro, de ordem subjetiva, decorre do ajuizamento da demanda pelo Ministério Público Federal. O segundo, de ordem material, decorre da afetação direta de bens, serviços e interesses da União. Cada um deles é, por si, suficiente à fixação da competência.

Foram diretamente atingidos, em razão do desastre, bens integrantes do patrimônio da União, de suas empresas públicas e entidades autárquicas, com a consequente interrupção de serviços públicos federais. Entre eles, universidades públicas[78], o hospital universitário de Santa Maria (HUSM)[79], agências da Caixa Econômica Federal[80] e do INSS[81], assim como as sedes do Poder Judiciário federal[82] e do Ministério Público Federal, o Aeroporto

[77] REsp n. 1.793.931/CE, relator Ministro Herman Benjamin, Segunda Turma, julgado em 9/2/2021, DJe de 17/12/2021.
[78] Disponível em: https://www.ufsm.br/2025/05/29/catastrofe-climatica
[79] Disponível em: https://projetocolabora.com.br/ods3/hospitais-universitarios-ficaram-a-beira-do-colapso-rs/
[80] Disponível em: https://www.correiodopovo.com.br/not%C3%ADcias/cidades/danos-da-enchente-rs-ainda-tem-ag%C3%Ancias-banc%C3%A1rias-fechadas-1.1538230
[81] Disponível em: https://gauchazh.clicrbs.com.br/porto-alegre/noticia/2024/05/enchentes-fecham-agencias-do-inss-em-ao-menos-11-municipios-do-rs-clw6dpd4m00ch014e7gmgt93y.html
[82] Disponível em: https://memoria.jfrs.jus.br/desastre-climatico-de-maio-de-2024/as-aguas-chegam-aos-predios-da-justica-federal/

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

Internacional Salgado Filho, bem público federal explorado mediante concessão, dentre outros.

O desastre determinou, ainda, o reconhecimento federal do estado de calamidade pública ou situação de emergência na quase totalidade dos municípios do Rio Grande do Sul, com o consequente acionamento dos instrumentos federais de resposta a desastres, notadamente no âmbito do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil e do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD), ambos sob gestão do Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Em virtude das inundações, o Governo Federal aprovou 1.556 planos de trabalho apresentados por municípios gaúchos e empenhou 1,5 bilhão de reais somente por meio da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil.

Os planos de trabalho aprovados contemplaram ações de assistência humanitária, restabelecimento de serviços essenciais e reconstrução de infraestruturas atingidas, entre as quais pontes e redes de drenagem.

A União instituiu, ainda, o Auxílio Reconstrução, benefício extraordinário criado pela Medida Provisória nº 1.219/2024 e ampliado pela Medida Provisória nº 1.250/2024, consistente em parcela única de R$ 5.100,00 por família desalojada ou desabrigada, pago por meio da Caixa Econômica Federal, que alcançou mais de 430 mil famílias e representou dispêndio superior a R$ 2 bilhões. Destinou, ainda, recursos a ações de habitação e de prevenção no âmbito do Novo Programa de Aceleração do Crescimento (Novo PAC).

Esses dispêndios extraordinários evidenciam não apenas o interesse federal na causa, mas também que os custos decorrentes do agravamento climático do evento foram integralmente suportados pelo erário e pela coletividade e não pelos agentes econômicos cuja atividade contribuiu para sua causação. É precisamente essa externalidade que a presente demanda busca corrigir, nos termos do princípio do poluidor-pagador e conforme a metodologia de quantificação que será detalhada posteriormente.

Demonstrados, assim, tanto a afetação direta de bens, serviços e interesses da União (nos termos do art. 109, I, da Constituição) quanto o critério subjetivo decorrente da presença do Ministério Público Federal no polo ativo, é competente a Justiça Federal para o

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

processamento e julgamento da presente ação, com a distribuição à Central de Processamento de Litígios Associados à Catástrofe Climática, especializada na matéria.

4.2. Mérito

4.2.1 Da responsabilidade civil ambiental (e climática)

O ordenamento jurídico assegura a tutela ressarcitória integral do dano ambiental, em suas dimensões patrimonial e extrapatrimonial, nos termos do art. 225, § 3º, da Constituição, do art. 14, § 1º, da Lei nº 6.938/1981 e do art. 1º, I, da Lei nº 7.347/85, este último expresso ao contemplar as ações de responsabilidade por danos morais e patrimoniais causados ao meio ambiente.

A responsabilidade civil ambiental estrutura-se sobre a lógica do risco: quem desenvolve atividade potencialmente lesiva ao meio ambiente assume o dever de prevenir os danos dela decorrentes e de internalizar os respectivos custos, por força dos princípios da prevenção, da precaução e do poluidor-pagador. Frustrada a prevenção, converte-se esse dever em obrigação de reparar, cujos pressupostos são o dano e o nexo de causalidade juridicamente relevante entre a atividade e a degradação verificada.

Em matéria ambiental, incide assim regime especial de responsabilidade civil objetiva, sob a orientação da **teoria do risco integral** e do **princípio do poluidor-pagador**. Trata-se de regime mais severo do que a responsabilidade objetiva comum que, além de dispensar a demonstração de culpa, não admite a invocação de excludentes de responsabilidade.

O STJ, em sede de recurso especial repetitivo,[83] já firmou a tese de que a responsabilidade civil ambiental é objetiva e informada pela teoria do risco integral:

> A responsabilidade por dano ambiental é objetiva, informada pela teoria do risco integral, sendo o nexo de causalidade o fator aglutinante que permite que o risco se integre na unidade do ato, sendo descabida a invocação, pela empresa responsável

[83] STJ. REsp. 1.374.284/MG, 2a Seção. Min. Rel. Luis Felipe Salomão. Julgado em 27/08/2014 e publicado no DJe de 05/09/2014.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

> pelo dano ambiental, de excludentes de responsabilidade civil para afastar sua obrigação de indenizar (Tese julgada sob o rito do art. 543-C do CPC/1973).[84]

Sob a teoria do risco integral e à luz do princípio do poluidor-pagador, aquele que desenvolve atividade potencialmente lesiva ao meio ambiente deve suportar os riscos e os custos dela decorrentes, não sendo juridicamente admissível a privatização dos benefícios econômicos acompanhada da socialização dos prejuízos ambientais.

Da adoção da teoria do risco integral no âmbito da responsabilidade civil objetiva pelo dano ambiental decorrem algumas consequências, a saber: (i) prescindibilidade da discussão acerca da culpa ou do dolo do agente para a atribuição do dever de indenizar; (ii) irrelevância da normalidade ou licitude da atividade geradora de poluição para que nasça o dever de indenizar[85] e (iii) inaplicabilidade, em favor do agente, das causas de exclusão de responsabilidade (caso fortuito, força maior, fato de terceiro).

O princípio do poluidor-pagador constitui referência central tanto para orientar comportamentos quanto para definir medidas de reparação. O princípio se apoia em uma lógica de natureza econômica, mas também ética, segundo a qual aquele que obtém os benefícios de uma atividade deve igualmente assumir os seus respectivos custos. Nessa linha, o Supremo Tribunal Federal (STF) assentou que o

> direito ambiental é norteado por diversos princípios, dentre eles o princípio do poluidor-pagador, que fundamenta a reparação dos danos ambientais [ou sua prevenção]. Por este princípio, entende-se que ao empreendedor deve ser imputado o custo social externo de sua produção. Em outras palavras, durante o processo de produção, não é proporcional que o empreendedor apenas aufira os lucros, enquanto a sociedade suporta os prejuízos decorrentes de sua atividade (externalidades negativas).[86]

No mesmo sentido, o Superior Tribunal de Justiça (STJ) consignou que o princípio impõe ao poluidor

> [...] o dever de arcar com as despesas de prevenção, repressão e reparação da poluição. Esse modelo oferece maior proteção do meio ambiente, patrimônio

[84] STJ. Jurisprudência em teses. Direito Ambiental. n. 30. Brasília. 18 de março de 2015, tese 10; e STJ. Jurisprudência em teses. Responsabilidade por dano ambiental. n. 119, Brasília. 22 de fevereiro de 2019, tese 1.
[85] Incabível, dessa forma, a alegação do agente poluidor de respeito aos padrões de emissão fixados pela autoridade administrativa, ou de que esta lhe havia outorgado licença ou autorização para o exercício da atividade questionada, uma vez que "é a *potencialidade de dano* que a atividade possa trazer aos bens ambientais que será objeto de consideração" (grifos do original). MILARÉ, Édis. Direito do Ambiente: doutrina, jurisprudência, glossário. 5ª ed. ref., atual. e ampl. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2007, p. 905.
[86] Supremo Tribunal Federal (Plenário). RE 654.833/AC. Rel. Min. Alexandre de Moraes. Julgado em: 17 abr. 2020.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

> coletivo da sociedade, impondo aos agentes econômicos a internalização dos custos externos à dinâmica de investimentos envolvidos em sua atividade privada, evitando-se a "privatização de lucros e socialização de perdas".[87]

Trata-se, portanto, de **diretriz** que orienta a imputação da responsabilidade civil e assegura que a reparação recaia sobre o agente que concorreu para o dano.

No caso dos autos, embora as emissões de GEE geradas pela demandada tenham contribuído – e sigam contribuindo – para os danos climáticos e socioeconômicos suportados pela população gaúcha, os custos correspondentes recaíram até aqui, integral e exclusivamente, sobre a coletividade e o erário. Coube à sociedade brasileira arcar com as externalidades negativas de atividade econômica cujos resultados são apropriados privadamente.

À vista disso, aplicam-se integralmente ao caso concreto os preceitos que regem a responsabilidade civil ambiental, a responsabilidade objetiva do art. 14, § 1º, da Lei nº 6.938/1981, a teoria do risco integral, o princípio do poluidor-pagador (art. 4º, VII, da mesma lei) e o dever de reparação integral do dano.

Demonstrados os danos e o nexo de causalidade juridicamente relevante entre as emissões históricas e continuadas atribuíveis à demandada e o agravamento dos eventos extremos que atingiram o Rio Grande do Sul, é impositivo o dever de suportar os custos dos danos materiais e morais experimentados pela coletividade.

4.2.2. Da responsabilidade do poluidor indireto

A pluralidade de agentes poluidores é uma das peculiaridades do dano ambiental, e mais ainda de sua dimensão climática. O prejuízo resulta da ação poluidora de vários degradadores que, simultânea ou sucessivamente, concorrem para o resultado.

A adoção da teoria do risco integral, não desobriga a prova de nexo de causalidade vinculando a conduta do poluidor (direto ou indireto) – ou dos poluidores – ao resultado danoso.

---

[87] Superior Tribunal de Justiça. Terceira Turma. REsp 1.612.887-PR, Rel. Min. Nancy Andrighi, DJe 07 mai. 2020.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

13213426228

É nesse ponto que assume relevo a amplitude do conceito legal de poluidor. A Lei 6.938/1981, em seu artigo 3º, inciso IV, define poluidor como "a pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado, responsável, **direta ou indiretamente**, por atividade causadora de degradação ambiental". A norma não distingue, para fins de responsabilização, entre o agente que materialmente emite e aquele que integra, viabiliza ou se beneficia da atividade emissora: ambos respondem, desde que demonstrada a contribuição causal.

Nesse sentido, dispõem os Enunciados 33 e 53 da I Jornada Jurídica de Prevenção e Gerenciamento de Crises Ambientais do Conselho da Justiça Federal:

> Enunciado 33: O conceito de "empreendedor" da Lei n. 12.305/2010 (art. 2º, IV) deve ser interpretado à luz do conceito amplo de poluidor, contemplando tanto o poluidor direto quanto o poluidor indireto, tal como estabelecido pela legislação ambiental (art. 3º, IV, da Lei n. 6.938/1981) e alcançando, a depender do caso concreto, os agentes (públicos e privados, pessoas físicas e jurídicas) identificados na cadeia causal multifatorial (fática e normativa) da atividade poluidora.
>
> Enunciado 53: O poluidor indireto responde de forma solidária pela reparação e pela restauração do dano ambiental cumulativamente.

Como destaca Álvaro Mirra,[88] a ampla definição de poluidor contida na legislação ambiental brasileira torna viável a responsabilização civil de todos aqueles que, de alguma forma, pratiquem condutas e atividades direta ou indiretamente lesivas ao meio ambiente. Ao tratar especificamente do dano ambiental-climático, Álvaro Mirra enfatiza que a legislação ambiental brasileira possui instrumentos suficientes para responsabilização de poluidores indiretos:

> Registre-se que **o regime jurídico da responsabilidade civil ambiental, adotado pelo direito brasileiro, não é infenso à responsabilização desses principais degradadores do sistema climático, considerada a amplitude, já mencionada, com que o nosso direito trata os sujeitos responsáveis pelo dano ambiental, inclusive na sua dimensão climática, abrangente da pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado, que, direta ou indiretamente, causou o dano ou contribuiu para a sua ocorrência** (art. 3º, IV, da Lei n. 6.938/1981), equiparando-se, para fins de atribuição do dever de reparar, como assentado na jurisprudência do Superior Tribunal de Justiça, 'quem faz, quem não faz quando deveria fazer, quem deixa fazer, quem não se importa que façam, quem financia para que façam, e quem se beneficia quando outros fazem'.[89] (grifos postos)

[88] MIRRA, Álvaro Luiz Valery. Responsabilidade civil ambiental e a jurisprudência do STJ. *Cadernos Jurídicos*, São Paulo, ano 20, n. 48, p. 55, Março-Abril/2019.

[89] MIRRA, Álvaro Luiz Valery. *A dimensão climática do dano ambiental*: condições da reparabilidade do dano e aspectos do nexo causal. p. 29. In BURMANN, Alexandre; STEIGLEDER, Annelise Monteiro; e WEDY, Gabriel (coords.). *Litigância climática*: na visão da academia, advocacia, judiciário e ministério público. Londrina, PR: Thoth, 2026.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

A doutrina especializada reconhece que o regime brasileiro de responsabilidade civil ambiental é suficiente para alcançar os grandes degradadores do sistema climático, não sendo necessária a edição de norma específica sobre dano climático para que a pretensão reparatória seja acolhida. Não se postula a criação judicial de novo regime de responsabilidade, portanto, mas a aplicação do regime vigente a uma dimensão do dano ambiental cuja tutela já está compreendida no art. 3º, III e IV, e no art. 14, § 1º, da Lei nº 6.938/1981.

A figura do poluidor indireto assume relevo particular no contexto dos danos climáticos, um vez que as emissões de GEE decorrem de uma cadeia econômica integrada, que se inicia na extração e na produção dos combustíveis fósseis e se prolonga na distribuição e comercialização, bem como na utilização pelo consumidor final.A responsabilidade não se restringe, portanto, ao agente que materialmente libera os gases na atmosfera, alcançando aqueles que, mediante suas atividades econômicas, viabilizam, integram, mantêm e se beneficiam da cadeia causal, nos termos do art. 3º, inciso IV, da Lei nº 6.938/1981.

Essa compreensão encontra correspondência na metodologia utilizada pela plataforma *Carbon Majors*, adotada na presente demanda para a atribuição das emissões às respectivas fontes. A plataforma não se limita às emissões operacionais das instalações das entidades analisadas, mas também contabiliza as emissões decorrentes da combustão dos produtos por elas extraídos e comercializados[90]. Considera-se, assim, não apenas o carbono liberado durante as operações empresariais, mas igualmente aquele incorporado aos combustíveis colocados no mercado e posteriormente emitido em razão de sua utilização ordinária e previsível.

Cumpre esclarecer que a classificação científica e contábil das emissões como diretas ou indiretas não se confunde, de maneira automática, com a qualificação jurídica do agente como poluidor direto ou indireto. Os dados da *Carbon Majors*, entretanto, fornecem suporte empírico para a aplicação do conceito jurídico previsto na Política Nacional do Meio Ambiente, uma vez que permitem identificar e quantificar a contribuição das empresas que produzem e comercializam os combustíveis cuja utilização gera emissões substanciais de GEE. Demonstram, assim, que a contribuição dessas entidades para a degradação climática não se limita às emissões ocorridas em suas próprias instalações (escopo 1), mas alcança as

[90] Conhecidas como emissões de Escopo 3. Disponível em: https://ghgprotocol.org/corporate-standard

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

consequências inerentes ao modelo econômico que estruturam, abastecem e do qual extraem proveito.

Aplicada a distinção ao caso concreto, tem-se que a demandada responde, na qualidade de poluidora direta, pelas emissões operacionais de suas atividades no território nacional e pelas emissões decorrentes da combustão dos combustíveis que ela própria produz e comercializa no país, cuja destinação econômica normal e previsível é precisamente a queima. E responde ainda, na qualidade de poluidora indireta, pela sua participação na cadeia econômica global do grupo de que integra, cujas emissões cumulativas são tecnicamente atribuíveis segundo a metodologia exposta.

As emissões provenientes da combustão dos produtos comercializados não constituem fato estranho à atividade da demandada. A combustão corresponde à destinação econômica normal e previsível dos combustíveis fósseis, de modo que as emissões dela resultantes se inserem na cadeia causal desencadeada pela extração, produção e colocação desses produtos no mercado. A atuação do consumidor final não rompe o nexo causal, porquanto representa precisamente o uso para o qual os produtos foram produzidos e comercializados, configurando, quando muito, concausa que, à luz da solidariedade que rege a responsabilidade ambiental, não exclui nem reduz a responsabilidade do produtor.

No caso concreto, **a empresa demandada não apenas integra a cadeia econômica do grupo Shell, mas ela própria explora, produz e comercializa petróleo e gás em território nacional e se beneficia e concorre para a manutenção de modelo empresarial intensivo em carbono**.

É irrelevante, portanto, que não tenha liberado diretamente, em suas próprias instalações ou exclusivamente no território brasileiro, a totalidade das emissões historicamente atribuídas ao grupo econômico. Sua responsabilização decorre da contribuição juridicamente relevante para a cadeia de atividades que produz e perpetua a degradação do sistema climático, seja na condição de poluidora direta, quanto às emissões de sua própria atividade no país, seja na condição de poluidora indireta, quanto às emissões do grupo de que integra.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

4.2.3. Direito humano ao clima estável e seguro

O sistema climático constitui bem jurídico tutelado pelo ordenamento brasileiro, integrando o meio ambiente ecologicamente equilibrado de que trata o art. 225 da Constituição. Dessa qualificação, decorrem deveres de prevenção e de mitigação e, verificada a lesão, o dever de reparar, imputável aos agentes públicos e privados que hajam concorrido para sua produção ou agravamento, como expressamente reconhece a Política Nacional sobre Mudança do Clima, ao estabelecer, em seu art. 3º, III, que as medidas a serem adotadas considerarão as responsabilidades individuais quanto à origem das fontes emissoras e dos efeitos ocasionados sobre o clima.

A responsabilização assenta-se no direito fundamental ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, referido de modo transversal ao longo do texto constitucional[91] e pressuposto da dignidade da pessoa humana, fundamento da República, nos termos do artigo 1º da Constituição. Sobre sua natureza de direito fundamental, observa a doutrina:

> [...] a doutrina e a jurisprudência brasileiras são pacíficas no sentido de **reconhecer o direito ao meio ambiente como integrante do rol dos direitos e garantias fundamentais da pessoa humana**, constante da Lei Fundamental de 1988, não obstante estar situado fora do Título II do seu texto, ou seja, no catálogo dos direitos fundamentais. É, portanto, a partir de uma leitura "material" do seu conteúdo e das relações que mantém com os demais valores constitucionais fundamentais que o direito ao ambiente alcança o status de direito fundamental. **A configuração da sua fundamentalidade resulta da sua identificação com os valores que compõem o conteúdo essencial do princípio da dignidade da pessoa humana e do Estado de Direito brasileiro**."[92] (sem grifo no original)

O Supremo Tribunal Federal, em julgamento paradigmático do MS n. 22.164/1995[93], reconheceu essa condição, ocasião em que qualificou o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado como direito humano de terceira geração, de titularidade coletiva e expressão do princípio da solidariedade.[94]

---

[91] Vide Art. 5º, incisos XXII e XXIII; art. 20, incisos II a VII; art. 21, inciso IV; art. 23, incisos VI e VII; art. 24, incisos VI a VIII; art. 26, inciso I; art. 170, inciso VI; art. 184, parágrafo 2º; art. 186, inciso II; e art. 200, incisos VII e VIII.

[92] FENSTERSEIFER, Tiago; SARLET, Ingo Wolfgang. Curso de Direito Ambiental. Rio de Janeiro: Forense, 2020, p. 157.

[93] STF. Tribunal Pleno. MS 22.164. São Paulo. Rel. Min. Celso de Mello. Brasília. DJU 17/11/1995.

[94] Após o primeiro precedente mencionado, o STF se manifestou reiteradamente sobre o reconhecimento do direito humano fundamental ao meio ambiente ecologicamente equilibrado. Exemplos incluem: STF. Tribunal Pleno. Med. Caut. em ADI 3.540-1. Distrito Federal. Rel. Min. Celso de Mello. Brasília. Julgado em 1º/09/2005.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

A defesa do meio ambiente é, ademais, princípio conformador da ordem econômica, nos termos do art. 170, VI, da Constituição que impõe tratamento diferenciado conforme o impacto ambiental dos produtos e serviços e de seus processos de elaboração e prestação, na redação dada pela Emenda Constitucional nº 42/2003. Disso resulta que a livre iniciativa e a livre concorrência não são valores absolutos: o exercício da atividade econômica está constitucionalmente condicionado à observância da proteção ambiental, de modo que os custos ambientais da produção integram, por imposição constitucional, o próprio regime jurídico da atividade e não constituem externalidade legitimamente transferível à coletividade.

Detalhamento existente em âmbito infraconstitucional deixa claro, por outro lado, que a proteção do meio ambiente abarca a defesa de todos os elementos primordiais à sadia qualidade de vida das presentes e futuras gerações, em entendimento alinhado ao disposto no art. 3º, inciso I, da PNMA, que define meio ambiente como "*o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas*".

A proteção à "atmosfera" (art. 3º, inciso V, da PNMA) reforça o fato de que o equilíbrio climático, garantidor das condições de vida das espécies animais e vegetais que se desenvolvem no planeta, é condição lógica e necessária ao meio ambiente ecologicamente equilibrado. De modo convergente, o art. 1º da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), internalizada pelo Decreto nº 2.652/1998, define "sistema climático" como a totalidade da atmosfera, hidrosfera, biosfera e geosfera e suas interações. Da conjugação dos dois dispositivos resulta que o sistema climático integra o meio ambiente juridicamente tutelado, que a atmosfera é um recurso ambiental protegido, e que o sistema climático constitui a totalidade da atmosfera e de suas interações com os demais componentes do planeta.

Evidente, portanto, que "[o] direito fundamental à estabilidade climática pode ser compreendido a partir de uma interpretação ampla do direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado"[95], o que tem sido reconhecido expressamente pelo Supremo

DJU 03/02/2005; e STF. Tribunal Pleno. RE 654.833/Acre. Rel. Min. Alexandre de Moraes. Brasília, DJe 24/06/2020 dentre vários outros.

[95] MOREIRA, Danielle de Andrade (coord.). Litigância climática no Brasil: argumentos jurídicos para a inserção da variável climática no licenciamento ambiental, p. 34.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

Tribunal Federal em diversos casos de litigância climática fundamentados no artigo 225.[96] Pronunciamentos da Suprema Corte têm reiterado o caráter de direito humano fundamental conferido à estabilidade climática, especialmente a partir da jurisprudência da Corte Interamericana de Direitos Humanos (Corte IDH), no sentido de que o direito ao meio ambiente constitui um direito humano autônomo.[97]

A título ilustrativo, no julgamento da ADPF 708, relativa à omissão na alocação de recursos do Fundo Nacional sobre Mudança do Clima, o STF afirmou que:

> **a questão pertinente às mudanças climáticas constitui matéria constitucional.** Nessa linha, o art. 225, *caput* e parágrafos, da Constituição estabelece, de forma expressa, o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, impondo ao Poder Público o poder-dever de defendê-lo, preservá-lo e restaurá-lo, para presentes e futuras gerações.[98] (grifos nossos)

Na ocasião, o STF também reconheceu "o dever constitucional, supralegal e legal" de "proteger o meio ambiente e de combater as mudanças climáticas".[99] Em sua decisão, a Suprema Corte reafirmou a **supralegalidade de tratados internacionais de proteção ambiental**, dentre os quais se incluem os tratados climáticos, definindo-os como "espécie do gênero tratados de direitos humanos".[100] Os tratados com *status* supralegal posicionam-se como normas que possibilitam maior efetividade ao próprio texto constitucional, em especial, ao art. 225 da Constituição, mas também a todos os demais direitos humanos que dele dependem.

Do reconhecimento da supralegalidade decorre que os tratados climáticos **integram o ordenamento interno com hierarquia superior à da legislação ordinária**, condicionando sua interpretação e aplicação.

Não se trata, portanto, de invocar normas estranhas ao direito brasileiro: os compromissos climáticos assumidos pelo Estado brasileiro compõem o parâmetro normativo de interpretação do regime interno de responsabilidade civil ambiental, com eficácia

---

[96] Para uma análise sistemática de casos desse tipo, consultar MOREIRA, Danielle de Andrade *et. al.* Rights-based Climate Litigation in Brazil: An Assessment of Constitutional Cases before the Brazilian Supreme Court. **Journal of Human Rights Practice**. 2023. Disponível em: https://academic.oup.com/jhrp/advance-article/doi/10.1093/jhuman/huad023/7237274. Acesso em: 13 ago. 2023.

[97] MOREIRA, Danielle de Andrade *et. al*. Rights-based Climate Litigation in Brazil: An Assessment of Constitutional Cases before the Brazilian Supreme Court, p. 15-19.

[98] STF, ADPF 708, Rel. Min. Luís Roberto Barroso, Tribunal Pleno, j. 09/05/2023, DJe 10/05/2023. p. 9.

[99] STF, ADPF 708, Rel. Min. Luís Roberto Barroso, Tribunal Pleno, j. 09/05/2023, DJe 10/05/2023. p. 3.

[100] STF, ADPF 708, Rel. Min. Luís Roberto Barroso, Tribunal Pleno, j. 09/05/2023, DJe 10/05/2023. p. 10.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

irradiante sobre as relações privadas, o que a doutrina e a jurisprudência constitucional designam como eficácia horizontal dos direitos fundamentais.[101]

Considerando ainda a transversalidade dos impactos das mudanças climáticas, é importante destacar também sua relação com a fruição de diversos direitos fundamentais como o direito à vida, à saúde, à alimentação, dentre outros. Nessa linha, foi enfatizado, em voto vogal do julgamento da referida ADPF 708, como a proteção ao clima é pressuposto para a garantia de todos os direitos humanos, e que a emergência climática é a "questão de nosso tempo" e "a antessala de todas as outras".[102] A observação, embora constante de manifestação individual, expressa consequência necessária do que a Corte decidiu de modo unânime: sob a vertente de proteção dos demais direitos fundamentais, **a proteção do sistema climático constitui um imperativo no sistema jurídico brasileiro.**

Por tratar-se de direito fundamental, é estabelecida a obrigação de o Estado, na máxima medida de suas possibilidades, garantir a estabilidade do clima, o que expressa a necessidade de que aos três poderes – executivo, legislativo e judiciário – seja atribuído o poder-dever de garantir o equilíbrio ambiental e, logo, de adotar medidas de enfrentamento à emergência climática. Mas a proteção climática não constitui obrigação constitucional vinculante apenas ao Poder Público, mas também aos agentes econômicos cujas atividades contribuem significativamente para as emissões de GEE e para a degradação do sistema climático.

O reconhecimento, no plano interno, da natureza fundamental do direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado e de sua dimensão climática encontra correspondência na evolução da matéria no âmbito internacional. Essa compreensão foi consagrada por instâncias internacionais, entre as quais se destacam o Parecer Consultivo n. 23/2017 da Corte IDH, a Resolução n. 48/L.23/Rev.1 do Conselho de Direitos Humanos da ONU e a Resolução n. 76/300 da Assembleia Geral das Nações Unidas. Tais instrumentos reconhecem o direito humano ao meio ambiente e afirmam expressamente que as mudanças climáticas comprometem sua plena fruição, bem como o exercício de outros direitos fundamentais.

---

[101] A tutela do sistema climático, como dimensão autônoma do direito fundamental ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, decorre, portanto, da própria Constituição e dos tratados internacionais de proteção ambiental incorporados ao ordenamento com *status* supralegal. Não depende, pois, de norma específica sobre litigância climática, nem de construção jurisprudencial inovadora: trata-se de aplicação do regime constitucional e legal vigente a uma dimensão do bem jurídico já tutelado.

[102] STF, ADPF 708, Rel. Min. Luís Roberto Barroso, Tribunal Pleno, j. 09/05/2023, DJe 10/05/2023. p. 38.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

Mais recentemente, no ano de 2025, a Corte IDH e a Corte Internacional de Justiça, ao proferirem, respectivamente, o Parecer Consultivo PC-32/2025[103] e a Opinião Consultiva sobre as Obrigações dos Estados em Relação às Mudanças Climáticas[104], firmaram entendimento convergente no sentido de que **a proteção do sistema climático constitui condição indispensável à existência digna e ao pleno gozo dos direitos humanos**.

Ambas as Cortes reconheceram que as mudanças climáticas, impulsionadas pelas emissões antropogênicas de GEE, comprometem o exercício de direitos essenciais, e que a estabilidade climática configura pressuposto fático e normativo indispensável à efetiva garantia desses direitos. É precisamente o que se verificou no evento extremo de 2024 no Rio Grande do Sul, que produziu lesão concreta e documentada ao direito à vida, à saúde, à moradia, à educação e aos meios de subsistência, com a eliminação de postos de trabalho e a degradação de solos agrícolas.

Em sentido igualmente convergente, ambas as Cortes assentaram que os deveres de proteção climática impõem aos Estados a adoção de medidas destinadas ao enfrentamento das causas e dos efeitos das mudanças climáticas, inclusive mediante a regulação eficaz das atividades privadas e a atuação de todo o aparato estatal, **compreendido o Poder Judiciário**, com vistas a prevenir, coibir e **reparar** condutas empresariais lesivas ao sistema climático. Isso porque, ao apreciar demandas ambientais e climáticas, o Poder Judiciário não substitui indevidamente a Administração Pública nem formula política pública em abstrato, mas exerce sua função constitucional de tutela de direitos fundamentais, controle de legalidade e convencionalidade, garantia de acesso à justiça, reparação de danos e contenção de ilícitos atribuíveis a agentes públicos ou privados[105].

---

[103] CORTE INTERAMERICANA DE DIREITOS HUMANOS. Parecer Consultivo PC-32/25, parágrafos 89-90 e 377-378.

[104] CORTE INTERNACIONAL DE JUSTIÇA (CIJ). Obligations of States in respect of Climate Change. Advisory Opinion of 23 July 2025, parágrafos 373-376 e 403.

[105] Não por outro motivo, o Conselho Nacional de Justiça (CNJ) ao publicar a Resolução n. 364/2021 instituiu diretrizes para a gestão e o acompanhamento de processos ambientais pelo Poder Judiciário, reconhecendo a necessidade de tratamento adequado e prioritário das controvérsias ambientais, em razão de sua relevância constitucional e repercussão coletiva e intergeracional. Reforça, ainda, a prevenção do dano, a efetividade da tutela jurisdicional e a observância dos compromissos ambientais assumidos pelo Estado brasileiro. No mesmo sentido, a Recomendação CNJ n. 123/2022 orienta a observância, no julgamento de ações ambientais, dos tratados internacionais de proteção ambiental e dos direitos humanos ratificados pelo Brasil, da jurisprudência da Corte IDH e dos princípios da prevenção, precaução, vedação ao retrocesso, equidade intergeracional e máxima proteção ambiental. Também recomenda a consideração dos impactos diferenciados sobre grupos vulneráveis e futuras gerações, a utilização da melhor ciência disponível e a adoção de soluções capazes de assegurar reparação integral e efetiva, em consonância com os parâmetros do PC-32/2025.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

É exatamente essa a função que se espera que seja exercida neste processo. Não se postula que este Juízo formule política climática, defina metas de mitigação ou substitua a atuação dos órgãos reguladores. Postula-se provimento jurisdicional de natureza exclusivamente reparatória, fundado no regime de responsabilidade civil ambiental vigente, ante à demonstração de contribuição causal. Trata-se de exercício típico da função jurisdicional e não de intervenção em esfera reservada a outros Poderes.

4.2.4. Dano climático enquanto dimensão do dano ambiental

Toda ação humana, direta ou indiretamente, provoca alteração das características do meio ambiente. Quando tal modificação extrapola o "limite de tolerabilidade"[106] aceitável de interferência humana, isto é, quando impossibilitado que o próprio ambiente e seus elementos assimilem naturalmente aquela agressão externa, haverá dano ambiental, porquanto rompido o equilíbrio ecológico.[107]

O limite de tolerabilidade não se confunde com os padrões legais de emissão de matéria e energia (Lei nº 6.938/81, artigo 3º, inciso III, alínea "e"). Pode haver dano ambiental ainda que observados os parâmetros administrativos aplicáveis e mesmo quando tais parâmetros sequer existam para a substância em questão, como ocorre, no direito brasileiro, com as emissões de gases de efeito estufa, para as quais não há padrões de emissão fixados em relação à atividade da demandada, mas que, ainda assim, causam danos passíveis de responsabilização na seara ambiental.

O meio ambiente constitui macrobem jurídico autônomo, imaterial, indivisível, indisponível e de titularidade difusa, protegido em benefício das presentes e futuras gerações[108]. Dessa qualificação, decorre consequência de ordem prática: a lesão ao meio ambiente tem o condão de ocasionar danos de diferentes magnitudes, tais quais danos materiais (cuja reparação dá-se preferencialmente mediante a recomposição dos microbens

[106] MIRRA, Álvaro Luiz Valery. *Ação civil pública e reparação do dano ao meio ambiente*. 2ª ed. São Paulo: Juarez de Oliveira, 2004, p. 106.
[107] LYRA, Marcos Mendes. Dano Ambiental. *Revista de Direito Ambiental.* N. 8. São Paulo: Revista dos Tribunais, out./dez. 1997, p. 53.
[108] STEIGLEDER, Annelise Monteiro. *Responsabilidade Civil Ambiental: As dimensões do dano ambiental no direito brasileiro.* Porto Alegre: Livraria do Advogado, 2004, p. 100-101. LEITE, José Rubens Morato. *Dano Ambiental: do individual ao coletivo extrapatrimonial.* 2ª ed. rev., atual. e ampl. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2003, p. 91-92.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

ambientais danificados) e danos extrapatrimoniais, estes devidos pela violação a direito fundamental cujo equilíbrio é indispensável à dignidade humana.[109]

As lesões ao meio ambiente apresentam complexidades que dificultam seu equacionamento: múltiplos agentes, com atuações eventualmente distantes no tempo e no espaço, podem dar causa a danos difusos e a múltiplas vítimas, inclusive de gerações futuras. Essas características, longe de constituírem obstáculo à responsabilização, são precisamente o que justifica o regime jurídico especial adiante examinado.

A extensão do dano ambiental deve ser aferida, pois, sob diferentes perspectivas. No plano material, pode alcançar simultaneamente diversos componentes e funções ecológicas; no plano territorial, pode ultrapassar o local em que se desenvolveu a atividade poluidora; no plano temporal, pode persistir por décadas ou gerações; e, no plano existencial, pode atingir desde pessoas individualmente consideradas até toda a coletividade e os próprios processos ecológicos indispensáveis à manutenção da vida.

Todas essas dimensões se verificam no caso dos autos. O dano alcançou simultaneamente a atmosfera, os solos, a vegetação ripária, a fauna, os corpos hídricos e as funções ecossistêmicas de contenção de margens e de regulação hídrica. Ultrapassou largamente o local das emissões, atingindo o estado do Rio Grande do Sul. Os efeitos persistem com áreas que permanecem degradadas, pessoas que permanecem sem moradia definitiva e áreas cuja recuperação pode demorar mais do que uma década. Por fim, atingiu comunidades inteiras, a coletividade difusamente considerada e os próprios processos ecológicos, com projeção sobre as gerações futuras.

É nesse sentido que o STJ reconhece o **caráter multifacetário** do dano ambiental, cuja abrangência ética, temporal, ecológica e patrimonial alcança um vasto universo de vítimas, compreendendo indivíduos, coletividades, gerações futuras e os processos ecológicos considerados em si mesmos[110].

[109] LEITE, José Rubens Morato; MOREIRA, Danielle de Andrade. Sociedade de risco, danos ambientais extrapatrimoniais (morais) e a jurisprudência brasileira. *Revista OABRJ*, Rio de Janeiro. v. 26, n. 1, jan./jun. 2010, p. 119.
[110] SUPERIOR TRIBUNAL DE JUSTIÇA (STJ), 2ª T., REsp 1.198.727-MG, rel. Min. Herman Benjamin, j. 14.08.2012, DJe 09.05.2013.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

As particularidades inerentes à amplitude e à extensão do dano ambiental justificam a incidência de regime jurídico específico[111], fundado, entre outros elementos, na responsabilidade civil objetiva, na teoria do risco integral, na amplitude do conceito de poluidor, na solidariedade entre os responsáveis, na reparação integral e na inversão do ônus da prova.

Esse quadro multidimensional também se aplica ao dano climático, compreendido como espécie ou dimensão do dano ambiental decorrente das emissões de GEE que, ao extrapolarem o limite de tolerabilidade do sistema, passaram a causar o desequilíbrio climático e o cortejo dantesco de danos que lhe são correlatos[112].

O sistema climático dispõe de capacidade natural de assimilação de variações nas concentrações de gases de efeito estufa. O volume das intervenções antrópicas, consideradas em escala geológica, comprometeram, todavia, essa capacidade. Constitui conclusão científica consolidada que as atividades humanas, mediante emissões em escala planetária, alteraram e seguem alterando o funcionamento regular do sistema.

A **extrapolação do limite de tolerabilidade** das emissões foi reconhecida pelo sexto relatório do IPCC, o qual descreveu o alto risco de eventos climáticos extremos à medida que a elevação da temperatura da superfície global se aproxima do patamar de 1,5ºC[113]. O reconhecimento de que a capacidade de assimilação do sistema climático foi superada compete ao intérprete do direito, e é o que ora se sustenta, com base nos dados científicos a seguir reproduzidos. O quadro abaixo ilustra o fato[114]:

[111] MOREIRA, Danielle de Andrade. GONÇALVES, Victoria Lourenço de Carvalho e. SEGOVIA, Maria Eduarda. Aspectos conceituais e práticos da responsabilização civil por dano ambiental-climático no Brasil. Revista de Direito Ambiental. n. 131. jan-mar 2024. São Paulo, Ed. RT. p. 341-377.

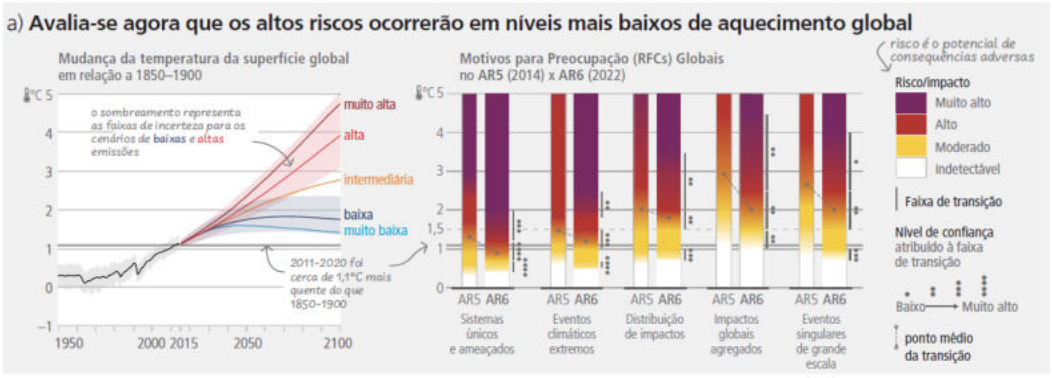
[112] MOREIRA, Danielle de Andrade *et al*. *Litigância climática no Brasil*: argumentos jurídicos para a inserção da variável climática no licenciamento ambiental. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora PUC-Rio, 2021, p. 37.

[113] A temperatura média global já aumentou cerca de 1,37°C a 1,45°C em relação ao período pré-industrial (1850–1900), com picos anuais que já ultrapassaram temporariamente a marca de 1,6°C. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/312384-onu-confirma-que-%C3%BAltima-d%C3%A9cada-foi-mais-quente-j%C3%A1-registrada

[114] Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

13213426928



A Organização Meteorológica Mundial (OMM), no relatório Estado do Clima Global, pela primeira vez, em 2025, incluiu o desequilíbrio energético da Terra como um dos principais indicadores climáticos[115]. O indicador mede a diferença entre a energia solar absorvida e a energia irradiada de volta ao espaço, e cuja inclusão evidencia o reconhecimento institucional de que o sistema acumula energia em ritmo incompatível com sua capacidade de regulação natural.

Por fim, de modo expresso e inequívoco, o relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) de 2025, recentemente divulgado[116], **reconheceu a impossibilidade de cumprimento das metas do Acordo de Paris**, destacando que, em um cenário otimista – no qual há cumprimento total das metas climáticas (NDCs) e as emissões líquidas de GEE são zeradas –, o pico de aquecimento atingirá entre 1,8° C a 2° C[117], o que implica dizer que **o limite de emissões que o sistema climático poderia naturalmente tolerar, sem catástrofes climáticas de larga escala, foi superado.**

O sistema climático constitui processo ecológico essencial, uno, planetário e indivisível. Sua unicidade, inclusive, foi reconhecida pelo Tribunal Regional Federal da 4ª Região no julgamento da Ação Civil Pública n. 5030786-95.2021.4.04.7100, relativa ao licenciamento ambiental da UTE Nova Seival e à necessária consideração da variável climática no licenciamento de usinas termelétricas no Estado do Rio Grande do Sul.

Na ocasião, o Tribunal assentou, com fundamento na ciência consolidada pelo IPCC, que o sistema climático constitui unidade sistêmica global, não sendo científica ou

[115] Disponível em: https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate/state-of-global-climate-2025
[116] Disponível em: https://wedocs.unep.org/items/156d074c-ab1d-4833-acf8-6343589ede9b
[117] Disponível em: https://www.nature.com/articles/d41586-026-02753-5

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161
13213426623

juridicamente admissível sua fragmentação em sistemas locais, regionais ou nacionais. Reconheceu, ainda, que as emissões de GEE constituem matéria de inequívoco interesse público, coletivo e transindividual[118].

Dessa compreensão resulta o enquadramento do sistema climático como elemento integrante do meio ambiente globalmente considerado. As características atribuídas ao macrobem ambiental projetam-se sobre o sistema climático: por se tratar de bem uno e de dimensão planetária, sua integridade não admite apropriação individual, fracionamento territorial ou disponibilidade por agentes públicos ou privados, impondo-se sua preservação em benefício das presentes e futuras gerações.

A danosidade climática possui assim natureza continuada, cumulativa e sinérgica, pois cada nova emissão soma-se às concentrações de GEE já acumuladas na atmosfera, agrava o desequilíbrio climático e amplia seus efeitos, ainda que a fonte poluidora e as consequências danosas estejam separadas espacial e temporalmente[119].

Dessa caracterização decorrem (i) a atualidade do dano, que não se exauriu no evento de 2024 e segue sendo agravado a cada nova emissão; (ii) a impossibilidade de qualificar como juridicamente irrelevante a contribuição da empresa ré; e (iii) a irrelevância da separação espacial e temporal entre a fonte emissora e a manifestação do dano, característica inerente ao fenômeno.

A extensão do dano é igualmente global e transfronteiriça, pois os impactos sobre o sistema climático não se limitam ao território em que tiveram origem as emissões[120]. Daí decorre que emissões produzidas em qualquer parte do planeta repercutem sobre o sistema climático, alcançando territórios que pouco ou nada concorreram para a sua causação, como se verificou no caso dos autos.

Nesse sentido, a Corte IDH, por meio do PC 32-2025, reconheceu expressamente que o sistema climático integra o meio ambiente e que o dano a ele causado constitui **forma**

[118] TRF4, Apelação Cível nº 5030786-95.2021.4.04.7100/RS, Terceira Turma, Rel. Desembargador Federal Roger Raupp Rios, julgado em 30 abr. 2025.
[119] STEIGLEDER, Annelise Monteiro. Considerações sobre a valoração do dano climático no direito brasileiro. p. 13. In BURMANN, Alexandre; STEIGLEDER, Annelise Monteiro; e WEDY, Gabriel (coords.). Litigância climática: na visão da academia, advocacia, judiciário e ministério público. Londrina, PR: Thoth, 2026.
[120] ROSA, Rafaela Santos Martins da. Dano Climático: conceitos, pressupostos e responsabilização. São Paulo: Tirant lo Blanch Brasil, 2023, p. 283.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

particular de dano ambiental que, por definição, ultrapassa as fronteiras do Estado em cujo território se originou ou para cuja ocorrência determinada atividade contribuiu. Vejamos:

> 295. Para a Corte, não há dúvida de que **o sistema climático global** —isto é, o conjunto de componentes que interagem entre si para determinar o clima do planeta— **é parte essencial do meio ambiente**, pois dele depende o desenvolvimento harmônico de múltiplos processos fundamentais para a conservação da vida em nível global. Portanto, impacto ao sistema climático constitui uma forma particular de dano ambiental. **O dano ambiental que atinge o sistema climático, ou dano climático é,** por definição, um dano transfronteiriço, uma vez que não se restringe ao território do Estado que contribuiu para sua ocorrência, mas, necessariamente, ultrapassa suas fronteiras.
> 296. Conforme exposto, **a obrigação de prevenção do dano ambiental abrange igualmente o dever de adotar medidas para prevenir o dano climático**. Tais medidas devem visar à redução das emissões de GEE (pars. 321 a 363 infra). O cumprimento do dever de prevenção em relação ao dano climático está submetido ao padrão de devida diligência reforçada (pars. 231 a 237 supra). **Ademais, segundo a jurisprudência deste Tribunal, as violações de direitos convencionais decorrentes do dano climático encontram-se sob a jurisdição do Estado em cujo território teve origem, ou que contribuiu para a produção desse dano, sempre que haja relação de causalidade entre esse fato e a violação dos direitos humanos de pessoas fora de seu território.**
> [...]
> 299**. O sistema climático integra esse todo e, portanto, embora esteja inexoravelmente vinculado a outros componentes do meio ambiente, sua proteção deve ser entendida como um objetivo específico no âmbito da proteção ambiental.** De fato, a proteção do sistema climático adquire características específicas e diferenciadas em virtude das funções que ele desempenha globalmente, dos elementos que o constituem e das dinâmicas necessárias para assegurar seu equilíbrio. A Corte destaca, nesse sentido, que **os danos ao sistema climático constituem uma forma de dano ambiental que, embora relacionado a outros, pode e deve ser distinguido de outros tipos de dano ambiental, tais como os resultantes da poluição ou da perda de biodiversidade**.[121] (Grifos postos).

No mesmo sentido, a Corte Internacional de Justiça reconheceu que o sistema climático constitui parte integrante e vital do meio ambiente, impondo-se a sua proteção em favor das presentes e futuras gerações e incidindo, também nessa matéria, o dever de prevenção de danos ambientais significativos:

> 273. O dever de prevenir danos significativos ao meio ambiente também se aplica ao **sistema climático, que é parte integrante e vital do meio ambiente e que deve ser protegido para as gerações presentes e futuras** (ver parágrafos 73-74 acima). Levando em consideração as observações acima (ver parágrafos 132-139), o Tribunal abordará agora, mais especificamente, certos elementos da obrigação de prevenção no âmbito do direito internacional consuetudinário, no contexto da "proteção do sistema climático e de outras partes do meio ambiente contra as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa". Os principais elementos desse

[121] Corte IDH, Opinião Consultiva 32-2025. Emergência Climática e Direitos Humanos, parágrafos 295 a 299.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

> dever são (a) o dano ambiental a ser prevenido e (b) a diligência devida como padrão de conduta exigido.[122] (Grifos postos, tradução nossa)

No plano do direito interno, a Lei nº 12.187/2009 (Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC) reconhece que as interferências antrópicas no sistema climático produzem efeitos adversos significativos sobre os ecossistemas, os sistemas socioeconômicos, a saúde e o bem-estar humanos. Ao estabelecer o dever de atuar para a redução dos impactos decorrentes dessas interferências, a PNMC incorpora a proteção da integridade climática ao regime jurídico ambiental brasileiro[123].

A relevância jurídica do dano climático é também objeto da política judiciária nacional. A Resolução CNJ nº 433/2021, que instituiu a Política Nacional do Poder Judiciário para o Clima e Meio Ambiente, impõe à(ao) magistrada(o), na condenação por dano ambiental, o dever de considerar expressamente o impacto do dano na mudança climática global:

> Art. 14. Na condenação por dano ambiental, o(a) magistrado(a) deverá considerar, entre outros parâmetros, o impacto desse dano na mudança climática global, os danos difusos a povos e comunidades atingidos e o efeito dissuasório às externalidades ambientais causadas pela atividade poluidora.

Atribui-se, portanto, ao Poder Judiciário o dever de adotar medidas de reparação ambiental que considerem o dano climático, afirmando sua existência e considerando a necessidade de uma resposta pronta, eficaz e progressiva à ameaça da mudança do clima com base no melhor conhecimento científico disponível. Trata-se de norma de política judiciária que vincula a atuação jurisdicional e que, no caso, encontra aplicação direta: a presente demanda submete a exame precisamente o impacto do dano na mudança climática global, os danos difusos suportados por comunidades atingidas e a necessidade de efeito dissuasório sobre as externalidades da atividade poluidora, os três parâmetros do art. 14 da Resolução.

No mesmo sentido, a Portaria CNJ nº 241/2020[124] instituiu o Observatório do Meio Ambiente e das Mudanças Climáticas do Poder Judiciário, com a finalidade, entre outras, de subsidiar a atuação jurisdicional e de propor políticas judiciárias voltadas à mitigação dos danos climáticos e dos danos ambientais decorrentes do aquecimento global, o que evidencia

---

[122] International Court of Justice. 23 July 2025 Advisory Opinion. Obligations of States in Respect of Climate Change. Paragraph 273.
[123] MOREIRA, Danielle de Andrade et al. Litigância climática no Brasil: argumentos jurídicos para a inserção da variável climática no licenciamento ambiental. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora PUC-Rio, 2021, p. 37.
[124] Disponível em: https://atos.cnj.jus.br/atos/detalhar/3565.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

o reconhecimento institucional da matéria climática como objeto próprio da atuação do Poder Judiciário.

A jurisprudência nacional, embora ainda em formação, igualmente vem reconhecendo o dano climático como manifestação do dano ambiental e submetendo-o ao regime da responsabilidade civil ambiental. As decisões proferidas pela 7ª Vara Federal Ambiental e Agrária da Seção Judiciária do Amazonas, por exemplo, em ações relacionadas a desmatamentos ilegais, expressamente qualificaram o dano climático como dano em curso, cumulativo e progressivo, agravado a cada nova emissão[125].

A compreensão do dano climático como dimensão específica do dano ambiental encontra respaldo expresso no próprio Poder Judiciário brasileiro. O Conselho Nacional de Justiça, ao instituir o Protocolo para Julgamento de Ações Ambientais, elaborado em cumprimento ao art. 14 da Resolução CNJ nº 433/2021, reconhece o sistema climático como bem jurídico ambiental e define o dano climático nos seguintes termos:

> Dano climático: conduta (comissiva ou omissiva) deletéria à funcionalidade do sistema climático em sua totalidade considerado. O dano climático é, portanto, espécie ou dimensão especificamente climática da danosidade ao macrobem ambiental, que lesa, de modo direto, o bem jurídico sistema climático e, de modo difuso, a coletividade[126].

A definição adotada pelo CNJ **reconhece que a degradação do sistema climático não constitui fenômeno estranho ao regime jurídico da responsabilidade ambiental, mas verdadeira espécie ou dimensão da danosidade incidente sobre o macrobem ambiental**. A lesão climática apresenta, assim, dupla projeção, atingindo diretamente a funcionalidade e a estabilidade do sistema climático e repercutindo, de forma difusa, sobre a coletividade,

---

[125] 7ª Vara Federal Ambiental e Agrária da SJAM. Ação Civil Pública 1022783-69.2021.4.01.3200, julgado em 31/03/2025.; 7ª Vara Federal Ambiental e Agrária da SJAM. Ação Civil Pública 1022781-02.2021.4.01.3200, julgado em15/08/2025.; 7ª Vara Federal Ambiental e Agrária da SJAM. Ação Civil Pública 1015021-02.2021.4.01.3200, julgado em 15/08/2025.; 7ª Vara Federal Ambiental e Agrária da SJAM. Ação Civil Pública 1022843-42.2021.4.01.3200, julgado em 20/09/2024.; 7ª Vara Federal Ambiental e Agrária da SJAM. Ação Civil Pública 1022372-26.2021.4.01.3200, julgado em 02/04/2025.; 7ª Vara Federal Ambiental e Agrária da SJAM. Ação Civil Pública 1022373-11.2021.4.01.3200, julgado em 02/04/2025.; 7ª Vara Federal Ambiental e Agrária da SJAM. Ação Civil Pública 1022623-44.2021.4.01.3200, julgado em 26/08/2025.; 7ª Vara Federal Ambiental e Agrária da SJAM. Ação Civil Pública 1022423-37.2021.4.01.3200, julgado em 02/04/2025.; 7ª Vara Federal Ambiental e Agrária da SJAM. Ação Civil Pública 1022425-07.2021.4.01.3200, julgado em 20/09/2024.; 7ª Vara Federal Ambiental e Agrária da SJAM. Ação Civil Pública 1022844-27.2021.4.01.3200, julgado em 04/04/2025.; 7ª Vara Federal Ambiental e Agrária da SJAM. Ação Civil Pública 1015022-84.2021.4.01.3200, julgado em 20/09/2024.; 7ª Vara Federal Ambiental e Agrária da SJAM. Ação Civil Pública 1022371-41.2021.4.01.3200, julgado em 03/04/2025.; 7ª Vara Federal Ambiental e Agrária da SJAM. Ação Civil Pública 1015025-39.2021.4.01.3200, julgado em 02/04/2025.

[126] Disponível em: https://atos.cnj.jus.br/files/compilado212758202411266746 3d5ee91a0.pdf.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

mediante consequências ambientais, sociais e econômicas decorrentes da alteração desse sistema.

Dessa dupla projeção decorre a delimitação do objeto desta demanda: não se postula a reparação do dano causado ao sistema climático em si, mas a reparação das consequências concretas dessa alteração, verificadas no território brasileiro e suportadas pela coletividade gaúcha.

4.2.4.1. Dano climático direto e indireto

A dupla projeção do dano climático permite identificar duas formas complementares de manifestação da danosidade: o dano climático direto, que atinge a funcionalidade do sistema climático em si, e o dano climático indireto, que se materializa nas consequências concretas dessa alteração sobre os ecossistemas, as pessoas e os bens..

O dano ao sistema climático resulta do somatório global de emissões individualizáveis de diversas fontes poluidoras.[127] Afeta o sistema climático em si, originando-se da degradação da atmosfera devido à emissão histórica e continuada de GEE por variadas fontes e atividades antropogênicas ao longo de décadas, com efeitos sobre todos os outros componentes do sistema (criosfera, hidrosfera, biosfera, geosfera) e, consequentemente, sobre todos os ecossistemas naturais ou modificados pelo homem.

Do dano climático direto decorrem outros danos ambientais, que possuem inequívoca relação causal com as mudanças climáticas geradas pelas emissões antropogênicas de GEE, a exemplo do derretimento das geleiras, do aumento do nível dos oceanos, da intensificação de ondas de calor e das chuvas extremas ou mais escassas. Esses danos difusos causados ao macrobem ambiental – e que decorrem do dano gerado ao sistema climático em si – são passíveis de provocar também diversos prejuízos patrimoniais individuais e coletivos, aos recursos naturais, à saúde das pessoas e a demais direitos resguardados pela Constituição (danos pessoais, patrimoniais e extrapatrimoniais). São os chamados **danos climáticos indiretos**.[128]

[127] ROSA, Rafaela Santos Martins da. *Dano Climático*: conceitos, pressupostos e responsabilização. São Paulo: Tirant lo Blanch Brasil, 2023, p. 262 e p. 267.
[128] ROSA, Rafaela, Santos Martins da. *Dano climático:* conceitos, pressupostos e responsabilização. São Paulo: Tirant lo Blanch Brasil, 2023, p. 262 e p. 295.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

O dano climático indireto pode configurar ofensa a direitos difusos, coletivos, individuais homogêneos e/ou individuais. A devastação ambiental provocada pela intensificação de chuvas extremas, por exemplo, atinge simultaneamente os ecossistemas, a coletividade e as pessoas diretamente afetadas por alagamentos, inundações, deslizamentos, destruição de moradias e interrupção de serviços essenciais[129].

A legislação brasileira, embora não classifique expressamente os tipos de dano climático, fornece o conteúdo normativo que autoriza a distinção. O art. 2º, inciso II, da Lei nº 12.187/2009 (Política Nacional sobre Mudança do Clima) define os efeitos adversos da mudança do clima de modo a abranger tanto as alterações no meio físico, na biota e nos ecossistemas naturais ou manejados, quanto **os prejuízos causados ao funcionamento dos sistemas socioeconômicos, à saúde e ao bem-estar humanos**, senão vejamos:

> Art 2º Para os fins previstos nesta Lei, entende-se por:
> [...]
> II - efeitos adversos da mudança do clima: mudanças no meio físico ou biota resultantes da mudança do clima que tenham efeitos deletérios significativos sobre a composição, resiliência ou produtividade de ecossistemas naturais e manejados, sobre o funcionamento de sistemas socioeconômicos ou sobre a saúde e o bem-estar humanos;
> [...]

No âmbito internacional, essas consequências são também compreendidas pelo conceito de "perdas e danos", que abrange prejuízos econômicos e não econômicos decorrentes de eventos climáticos extremos ou de processos de evolução lenta que ultrapassem a capacidade de adaptação das populações e dos ecossistemas. Inserem-se nessa categoria a perda de vidas, moradias, infraestrutura, renda, cultura, modos de vida e biodiversidade[130].

A responsabilização de agentes econômicos por danos climáticos indiretos também vem sendo postulada no âmbito da litigância climática estrangeira. As demandas *Hugues Falys v. TotalEnergies*[131] e *Town of Carrboro v. Duke Energy Corp.*[132] exemplificam ações em

[129] ROSA, Rafaela, Santos Martins da. *Dano climático*: conceitos, pressupostos e responsabilização. São Paulo: Tirant lo Blanch Brasil, 2023, p. 262 e p. 397.
[130] Ver como referência o conceito de "Perdas e Danos" no Glossário desenvolvido pelo Observatório Interdisciplinar das Mudanças Climáticas (OIMC) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), disponível em: https://obsinterclima.eco.br/glossario/.
[131] Disponível em: https://www.climatecasechart.com/document/hugues-falys-fian-greenpeace-ligue-des-droits-humains-v-totalenergies-the-farmer-case_5077.
[132] Disponível em: https://www.climatecasechart.com/collections/town-of-carrboro-v-duke-energy-corp-_845345.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

que as contribuições históricas de grandes empresas intensivas em carbono são relacionadas à intensificação de eventos climáticos extremos e aos prejuízos concretos suportados por particulares e entes públicos.

A distinção entre dano climático direto e indireto é essencial para a adequada delimitação do objeto da presente demanda. Embora as emissões de GEE atribuíveis à empresa ré concorram para a degradação da integridade e da funcionalidade do sistema climático, o pedido formulado nestes autos não se volta ao dano climático direto, cuja reparação *in natura* é materialmente inviável mas à reparação das consequências concretas daí decorrentes, materializadas nos danos ambientais, patrimoniais e extrapatrimoniais suportados pela coletividade gaúcha em razão dos eventos climáticos extremos de abril e maio de 2024.

4.2.5 Nexo de causalidade

No âmbito da responsabilidade civil objetiva amparada pela teoria do risco integral, exige-se apenas o dano ambiental, a atividade de risco e nexo de causalidade ligando um e outro.

Segundo o Superior Tribunal de Justiça, a responsabilidade civil objetiva pelo dano ambiental, fundada no risco integral, abarca um conceito alargado de nexo de causalidade:

> Para o fim de apuração do nexo de causalidade no dano ambiental, equiparam-se quem faz, quem não faz quando deveria fazer, quem deixa fazer, quem não se importa que façam, quem financia para que façam, e quem se beneficia quando outros fazem.[133]

Portanto, incumbe ao responsável pelo empreendimento ou atividade reparar eventuais prejuízos causados, desde que o evento danoso tenha ocorrido no curso ou em razão de atividade potencialmente degradadora.

[133] STJ, 2ª Turma, REsp. 650.728-SC, Rel. Min. Herman Benjamin, Brasília, j. 23/10/2007, DJ 02/12/2009. No mesmo sentido, ver: STJ, 2ª Turma, REsp. 1.071.741-SP, Rel. Min. Herman Benjamin, Brasília, j. 24/03/2009, DJ 16/12/2010; STJ, 1ª Turma, REsp. 1.090.968-SP, Rel. Min. Luiz Fux, Brasília, DJ 03/08/2010; STJ, 4ª Turma, REsp. 1.381.211/TO, Rel. Min. Marco Buzzi, Brasília, DJ 19/09/2014; STJ, 2ª Seção, REsp. REsp 1.602.106/PR, Rel. Min. Ricardo Villas Boas Cueva, DJe 22/11/2017; STJ, 2ª Seção, REsp 1.596.081/PR, Rel. Min. Ricardo Villas Boas Cueva, DJe 22/11/2017; STJ, 1ª Seção, REsp. 1.962.089/MS, Rel. Min. Assusete Magalhães, DJe 26/09/2023; STJ, 1ª Seção, REsp 1.953.359/SP Rel. Min. Assusete Magalhães, DJe 26/09/2023.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

O nexo de causalidade é o elemento da responsabilidade civil ambiental em que se concentram as maiores dificuldades do instituto, já que o dano pode ser fruto de várias causas concorrentes, simultâneas e sucessivas, raramente tendo uma única e linear fonte.[134]

O distanciamento temporal e espacial entre a atividade e o evento danoso amplia a complexidade da relação de causa-efeito, dificultando a identificação precisa das condutas que concorreram para o prejuízo. A dificuldade acentua-se nas hipóteses de manifestação retardada ou cumulativa, em que o dano, não constatado de imediato, deixa para produzir consequências sérias na geração que sucederá a presente, atingindo vítimas pulverizadas e, às vezes, anônimas, um fenômeno que o Ministro Herman Benjamin[135] denominou de "vitimização coletiva".

Essas complexidades ampliam-se na dimensão climática do dano, em que a multicausalidade é incontornável, pois não há certeza absoluta quanto ao grau de contribuição de cada fonte poluidora, dada a multiplicidade de emissores em escala global.

A presente demanda não pretende superar essa incerteza, mas conformar-se a ela e, em razão disso, reconhecer a multicausalidade e postular reparação parcial do dano, limitada à parcela do dano proporcional à contribuição da demandada para as emissões globais, apurada segundo a melhor ciência disponível. Daí a opção por dispensar a reparação integral que a solidariedade autoriza.

Em razão dos mencionados desafios, tem-se defendido, especialmente em matéria ambiental, a adoção de um padrão probatório compatível com a complexidade e a incerteza científica inerentes à demonstração do nexo de causalidade, substituindo-se a exigência de certeza absoluta por um juízo de **verossimilhança**, amparado em grau de **probabilidade séria** e fundado na experiência e na melhor ciência disponível[136].

---

[134]STEIGLEDER, Annelise Monteiro. *Responsabilidade Civil ambiental:* as dimensões do dano ambiental no direito brasileiro, 2004, Porto Alegre: Livraria do Advogado, p. 196-197.

[135] BENJAMIN, Antonio Herman V. Responsabilidade civil pelo dano ambiental. *Revista de Direito Ambiental.* N. 9: São Paulo: Revista dos Tribunais, jan./mar. 1998, p. 12/13.

[136]LEITE, José Rubens Morato e CARVALHO, Delton Winter de. Nexo de causalidade na responsabilidade civil por danos ambientais. *Revista de Direito Ambiental*. n. 47, 2007, p. 84; e MIRRA, Alvaro Luiz Valery. Responsabilidade civil ambiental e a jurisprudência do STJ. *Cadernos jurídicos da Escola Paulista de Magistratura.* São Paulo, ano 20, n. 48, Mar./Abr. 2019, p. 54.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

Tal compreensão encontra respaldo no **princípio da precaução**, segundo o qual a incerteza científica não pode operar em benefício do potencial poluidor nem constituir obstáculo à tutela do meio ambiente. Demonstrada a plausibilidade científica da relação entre determinada atividade e o dano ambiental, a dúvida remanescente deve ser resolvida em favor da proteção ambiental, inclusive mediante a redistribuição ou inversão do ônus probatório, incumbindo ao agente potencialmente responsável afastar a relação causal que sobre ele recai.

Essa orientação assume especial relevância nos litígios climáticos, em que a causalidade é, por natureza, complexa, cumulativa e multicausal, não sendo juridicamente razoável exigir a demonstração de uma relação causal linear e exclusiva entre as emissões de determinado agente e o evento extremo. O que se exige é a demonstração, à luz da melhor ciência disponível, de uma contribuição causal suficientemente provável e juridicamente relevante para a produção ou agravamento do dano, sem que as incertezas científicas residuais possam ser utilizadas para inviabilizar a própria responsabilização ambiental.

Nesse sentido:

> ADMINISTRATIVO. PROCESSUAL CIVIL. AGRAVO DE INSTRUMENTO. TUTELA DE URGÊNCIA. ASSOCIAÇÃO. DEFESA DO MEIO AMBIENTE. INTERESSE DA COLETIVIDADE. AJG. POSSIBILIDADE. PRINCÍPIO DA PRECAUÇÃO E PREVENÇÃO. [...]
> 3. Na forma da jurisprudência do STJ, [...] não se pode deixar de ter em conta os princípios que regem o direito ambiental (precaução, prevenção e reparação), principalmente, para a hipótese, **o Princípio da Precaução, no qual o meio ambiente deve ter em seu favor o benefício da dúvida no caso de incerteza (por falta de provas cientificamente relevantes) sobre o nexo causal entre determinada atividade e um efeito ambiental negativo** (STJ, AgInt no AREsp 1.311.669/SC, Rel. Ministro RICARDO VILLAS BÔAS CUEVA, TERCEIRA TURMA, DJe de 06/12/2018)[137]. (grifo nosso)

Justificadamente atenuado o rigor da prova do nexo causal, a configuração da relação de causalidade passa a depender de um juízo de probabilidade, e não de certeza absoluta. Nos danos ambientais localizados, a doutrina e a jurisprudência têm exigido elevado grau de probabilidade de que o prejuízo derive da atividade do réu. Na causalidade climática, contudo, o padrão adequado não é o da probabilidade de causação exclusiva, inexistente por

[137] TRF4, AG 5010927-48.2024.4.04.0000, 4ª Turma , Relator LUÍS ALBERTO D'AZEVEDO AURVALLE , julgado em 09/10/2024.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

definição, dada a multiplicidade de fontes, mas o da **demonstração, cientificamente fundada, de que a atividade do agente concorreu de modo mensurável para o aumento da probabilidade e da intensidade do evento danoso.**

Eugenio Facchini Neto comenta que, para fins de reparação civil, a rigorosa identificação do nexo causal foi flexibilizada, deixando de se exigir a certeza absoluta em favor de um juízo de probabilidades, amparado por dados estatísticos que sejam dotados de verossimilhança. Em suas palavras:

> A busca da certeza absoluta pode ser paralisante. Ou, caso não se a atinja, pode redundar em prejuízo para a parte de um processo que tinha o ônus de provar algum fato. Disso decorre que inevitavelmente temos que aceitar uma flexibilização da lógica da certeza, abrindo espaço para a lógica da probabilidade na identificação do nexo causal, como sustenta Schreiber (2007, p. 75). O exame de experiências estrangeiras demonstra que paulatinamente se vem abandonando o modelo da exigência de certeza absoluta para se poder acolher uma pretensão autoral. Admitem-se raciocínios probabilísticos, troca-se a verdade (inatingível) pela verossimilhança, levam-se a sério os dados estatísticos fornecidos pela ciência.[138]

Délton Winter de Carvalho leciona que as teorias clássicas sobre nexo de causalidade devem ser superadas porque seriam insuficientes e ineficientes diante da complexidade da questão ambiental.[139] Por essa razão, tendo em conta o fenômeno da "dispersão do nexo causal", também denominado de "causalidade complexa", deve-se falar na "regra da atenuação do relevo do nexo causal, bastando que a atividade do agente seja potencialmente degradante para sua implicação nas malhas da responsabilidade".[140]

Vale destacar que, em decisão publicada em 14 de novembro de 2025 no caso *Município de Mariana v. BHP*, a Alta Corte de Justiça de Londres, ao decidir o caso com base na legislação ambiental brasileira, na jurisprudência dos tribunais nacionais e nos pareceres de especialistas, acolheu a tese de que a teoria de causalidade aplicada à responsabilidade civil ambiental é a equivalência das condições.[141]

---

[138] NETO FACCHINI, Eugenio. A ciência estatística e sua repercussão no nexo causal da responsabilidade civil: levando a sério a probabilidade *in* GONÇALVES, Ruben, Miranda; BRITO, Paulo de (Coords.) *Estudos de Direito, Desenvolvimento e Novas Tecnologias*.1a ed. Instituto Iberoamericano de Estudos Jurídicos, Portugal, 2020, p. 92.

[139] CARVALHO, Délton Winter de. *Dano ambiental futuro*: a responsabilização civil pelo risco ambiental. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2008, p. 113.

[140] SILVA, José Afonso da. Direito Ambiental Constitucional. 6a ed., atual. São Paulo: Malheiros, 2007. p. 317.

[141] Decisão original, página 86: "361. Em resumo, concordo com a opinião do Professor Sarlet de que o teste de causalidade aplicável em casos de danos ambientais é o da equivalência de condições, ou o teste da *conditio sine qua non*." (tradução livre).

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

Abaixo, entendimento do STJ sobre o conceito alargado de nexo de causalidade:

> PROCESSUAL CIVIL. ADMINISTRATIVO. AMBIENTAL. VÍCIO DE FUNDAMENTAÇÃO. INEXISTÊNCIA. PEDIDOS IMPLÍCITOS. CONDENAÇÃO DO PODER PÚBLICO POR CONDUTAS OMISSIVAS. OBRAS PÚBLICAS REALIZADAS SEM LICENCIAMENTO AMBIENTAL. FISCALIZAÇÃO, COMBATE E MITIGAÇÃO/RECUPERAÇÃO DE DANOS CAUSADOS POR PARTICULARES. POLUIDOR INDIRETO. INOVAÇÃO RECURSAL INEXISTENTE. INTERPRETAÇÃO LÓGICO-SISTÊMICA DA INICIAL. NECESSIDADE. NEXO CAUSAL. RELEITURA DO CONCEITO ORTODOXO. CONTRIBUIÇÃO SUBSTANCIAL PARA O RESULTADO DANOSO E VIOLAÇÃO DE DEVER AMBIENTAL. SUFICIÊNCIA PARA A RESPONSABILIZAÇÃO. 1. Não há vício de fundamentação quando o acórdão recorrido decide integralmente a controvérsia, de maneira sólida e fundamentada. 2. O Poder Público e seus agentes possuem especial dever de observância do ordenamento ambiental, podendo a omissão na aplicação das normas, no combate à degradação ou na recuperação das áreas, ser compreendida no conceito de poluidor indireto. 3. A interpretação das pretensões levadas a juízo demandam análise lógico-sistêmica das manifestações das partes. A identificação pelo julgador de pedidos, ainda que implícitos, nas petições não enseja violação ao princípio da adstrição ou congruência. **4. Em direito ambiental (entre outras áreas de inerente complexidade), quando diversos fatores ou agentes contribuem de forma substancial para o resultado danoso, o conceito tradicional de nexo causal exige releitura. A impossibilidade de prova (positiva ou negativa, com inversão do ônus probatório) da influência específica do ato (omissivo ou comissivo) para o dano não pode inviabilizar a tutela protetiva do meio ambiente. Nessa circunstância, deve-se verificar a relação entre a conduta (ativa, negligente ou omissiva) verificada e o dever do imputado em evitá-la, bem como sua relevância para o resultado, e não exatamente a causalidade (conceito ele próprio impreciso e variável conforme as concepções epistemológicas adotadas) concreta e determinada entre a ação/omissão e o dano ambiental**. 5. Hipótese em que a pretensão de análise das condutas ambientais omissivas dos recorridos não configura inovação recursal. 6. Agravo conhecido para conhecer em parte do recurso especial e, nessa extensão, dar-lhe parcial provimento, a fim de determinar a apreciação do pleito alusivo aos atos omissivos arrolados pelo autor.[142] (Grifou-se)

Em suas razões de decidir, a Segunda Turma do STJ consolidou a seguinte tese:

> Mais ainda, **em direito ambiental, é preciso ressignificar alguns conceitos tradicionais, como o próprio nexo causa**l. Ele deve estar presente, indubitavelmente, mas **quando há diversos poluidores/transgressores das normas, e não se pode precisar com o grau de certeza ortodoxo a contribuição de cada um deles para a degradação constatada, qualquer ato comissivo ou**

[142] STJ. AREsp n. 1.945.714/SC, relator Ministro Og Fernandes, Segunda Turma, julgado em 24/5/2022, DJe de 20/6/2022.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

> **omissivo que seja relevante para a existência do dano (o que inclui sua não reparação) enseja a responsabilização do agente.**[143] (Grifou-se)

O Tribunal esclareceu ainda que "[n]o direito brasileiro, há diversas manifestações dessa ideia-força aglutinante e mobilizadora",[144] fazendo referência a julgados anteriores paradigmáticos que versavam, dentre outros aspectos, sobre a problemática do estabelecimento do nexo de causalidade.[145]

Seguindo essa lógica, o Tribunal referencia casos paradigmáticos estrangeiros que adotam tal concepção: nos Estados Unidos, *Massachusetts v. EPA* (549 U.S. 497 (2007)); na Holanda, *Urgenda Foundation v. State of the Netherlands* ([2015] HAZA C/09/00456689); no Canadá, *Snell v Farrell* ([1990] 2 S.C.R. 311); na Austrália, *March v Stramare* ((1991) 171 CLR 506). Merece registro que os paradigmas invocados pelo próprio Superior Tribunal de Justiça incluem **casos fundadores da litigância climática mundial**. Não se trata, portanto, de transposição inovadora de experiências estrangeiras promovida pelos autores. A Corte Superior já as incorporou expressamente ao construir sua compreensão sobre o nexo de causalidade em matéria ambiental.

O Tribunal conclui que diversos exemplos de jurisdições estrangeiras e nacional convergem para o entendimento da necessidade da releitura sobre o conceito ortodoxo de nexo causal. Afirma-se que:

> Os exemplos em cada jurisdição, e entre elas, são variados e multiplicam-se, mas todos desembocam em uma mesma conclusão: **a visão ortodoxa de nexo causal não se aplica, sempre e sem temperamentos, em casos complexos, notadamente ambientais, quando vários fatores e agentes, singularmente considerados, influem no resultado danoso (no mínimo, pela ampliação do risco), mas não se pode precisar qual deles é determinante, ou em que proporção, para o fato que se busca reparar**. Nessa circunstância, há que se investigar o nexo causal entre a conduta imputada e, não exatamente o dano, senão o dever de evitá-lo ou mitigá-lo.[146] (Grifou-se)

---

[143] STJ. AREsp n. 1.945.714/SC, relator Ministro Og Fernandes, Segunda Turma, julgado em 24/5/2022, DJe de 20/6/2022.
[144] STJ. AREsp n. 1.945.714/SC, relator Ministro Og Fernandes, Segunda Turma, julgado em 24/5/2022, DJe de 20/6/2022.
[145] Os julgados citados foram os seguintes: AgInt no Resp n. 1.869.374/PR, Relator Ministro Gurgel de Faria, Primeira Turma, Julgado em 4/10/2021, Dje de 19/10/2021; Resp n. 1.612.887/PR, Relatora Ministra Nancy Andrighi, Terceira Turma, Julgado em 28/4/2020, Dje de 7/5/2020; e Resp n. 1.449.765/SP, Relator Ministro Herman Benjamin, Segunda Turma, Julgado em 2/8/2016, Dje de 10/10/2016; Resp n. 650.728/SC, Relator Ministro Herman Benjamin, Segunda Turma, Julgado em 23/10/2007, Dje de 2/12/2009.
[146] STJ. AREsp n. 1.945.714/SC, relator Ministro Og Fernandes, Segunda Turma, julgado em 24/5/2022, DJe de 20/6/2022.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

As teorias causais clássicas, concebidas para danos de causalidade simples e localizada, portanto, não se aplicam sem adaptação ao dano ambiental e menos ainda à sua dimensão climática, caracterizada pela concorrência de fatores cumulativos e sinérgicos em escala planetária. Como demonstrado acima, o STJ firmou orientação segundo a qual, havendo múltiplos agentes e sendo impossível precisar com certeza ortodoxa a contribuição de cada um, é suficiente à responsabilização a **contribuição relevante para a existência do dano**, aferida à luz do dever de evitá-lo ou mitigá-lo. É esse o critério aplicável, e é sob ele que a presente demanda se estrutura.

No caso, é possível relacionar a atividade da empresa ré (emissora direta e indireta de gases de efeito estufa) e os danos narrados na inicial (eventos climáticos extremos), na condição de poluidor direto e indireto (Lei nº 6.938/1981, art. 3º, IV). Demonstrado o liame causal, configura-se o dever de reparar a parcela da degradação verificada no Rio Grande do Sul, resultado das fortes precipitações em 2024.

Na hipótese trazida aos autos, independentemente da teoria de causalidade que se venha a adotar, é inegável que o conhecimento científico produzido atualmente[147] é capaz de atestar, com segurança, que as mudanças climáticas são exacerbadas pelas atividades antropogênicas,[148] em especial pela emissão – direta ou indireta – de GEE decorrentes da queima de combustíveis fósseis.

4.2.5.1 Afastamento da tese da "Gota no oceano"

Antecipando-se linha de defesa recorrente nesta espécie de litígio, cumpre enfrentar o argumento segundo o qual a participação individual de determinado emissor, comparada ao conjunto global das emissões, não teria relevância causal suficiente para autorizar sua responsabilização, o conhecido argumento da "gota no oceano".

---

[147] O IPCC é um órgão internacional criado em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) que objetiva fornecer base científica sobre a mudança climática, seus impactos e riscos futuros, e opções para adaptação e mitigação.

[148] "A.1 It is unequivocal that human influence has warmed the atmosphere, ocean and land. Widespread and rapid changes in the atmosphere, ocean, cryosphere and biosphere have occurred". (IPCC. *Summary for policymakers*. 2021. p. 5. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf. Acesso em 23 Set. 2021).

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

13213126628

Esse argumento não se sustenta por três razões, qualquer uma delas suficientes para afastá-lo.

A primeira é **normativa**: a responsabilidade civil ambiental é solidária (art. 942 do Código Civil c/c art. 14, § 1º, da Lei nº 6.938/1981) e o conceito legal de poluidor é amplo (art. 3º, IV, da Lei nº 6.938/1981), de modo que responde pelo dano quem para ele concorreu, sem que a existência de outros corresponsáveis atenue a responsabilidade de cada um.

A segunda é **lógica**: a admissão do argumento implicaria a irresponsabilidade universal. Se a contribuição individual de cada emissor é, comparada ao total global, percentualmente pequena, e se essa pequenez afastasse a responsabilização, nenhum emissor jamais responderia, resultado incompatível com o dever constitucional de reparação integral do dano ambiental.

A terceira é **fática**: no caso dos autos, a contribuição da demandada não é diminuta. Sua participação corresponde a aproximadamente 2,02% de todas as emissões de CO2 provenientes de combustíveis fósseis e cimento contabilizadas desde 1854, percentual que, tratando-se de agente único em universo de milhares de fontes, é tecnicamente expressivo e juridicamente relevante.

Esse entendimento encontra amparo expresso no direito positivo. A Política Nacional sobre Mudança do Clima determina que as medidas nela previstas considerem "as responsabilidades individuais quanto à origem das fontes emissoras e dos efeitos ocasionados sobre o clima" (art. 3º, III, da Lei nº 12.187/2009[149]). O legislador brasileiro, portanto, não tratou as emissões como fenômeno indistinto e coletivo, reconheceu expressamente a existência de **responsabilidades individuais** aferíveis a partir da origem das fontes. Se a lei impõe que se considerem responsabilidades individuais quanto à origem das emissões, é porque admite que a contribuição de cada fonte seja identificada e valorada, o que é

[149] Artigo 3º da Lei nº 12.187/2009: "A PNMC e as ações dela decorrentes, executadas sob a responsabilidade dos entes políticos e dos órgãos da administração pública, observarão os princípios da precaução, da prevenção, da participação cidadã, do desenvolvimento sustentável e o das responsabilidades comuns, porém diferenciadas, este último no âmbito internacional, e, quanto às medidas a serem adotadas na sua execução, será considerado o seguinte: [...] III - as medidas tomadas devem levar em consideração os diferentes contextos socioeconômicos de sua aplicação, distribuir os ônus e encargos decorrentes entre os setores econômicos e as populações e comunidades interessadas de modo equitativo e equilibrado e sopesar as responsabilidades individuais quanto à origem das fontes emissoras e dos efeitos ocasionados sobre o clima".

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

logicamente incompatível com a tese de que a participação individual seria juridicamente irrelevante.

O argumento da "gota no oceano" foi expressamente rejeitado no caso *Lliuya v. RWE,*[150] em que um agricultor peruano pediu que a Corte de Essen condenasse a empresa de energia RWE a arcar com os custos necessários para proteger sua propriedade ameaçada por inundações ou deslizamentos de terra devido ao derretimento da geleira localizada nas proximidades, haja vista que esse impacto pode ser relacionado à contribuição global da empresa de emissões de GEE. O argumento da RWE de que suas emissões eram insignificantes para ser responsabilizada pelas mudanças climáticas não se sustentou, pois o Tribunal reconheceu que a participação da empresa nas emissões históricas globais (aproximadamente 0,47%) era alta o suficiente em relação a outros emissores e, pois, apta a ensejar responsabilidade.

Na decisão, o Tribunal concluiu que, na presença de múltiplos poluidores, é possível ajuizar uma ação judicial contra cada um deles, de modo que o autor, Saul Luciano Lliuya, neste caso, poderia pleitear reparação por danos apenas contra um deles, a RWE.[151] Entendeu-se que:

> Era irrelevante que se tratasse de um caso em que um grande número de poluidores estivesse envolvido. [...] O réu estava sendo responsabilizado apenas em relação à sua parcela de responsabilidade. [...]
>
> O fato de, segundo a alegação do autor, o réu ser um emissor em uma série de emissores industriais de CO_2, ou seja, um emissor entre vários, não impede o autor de apresentar uma reclamação exclusivamente contra o réu como o emitente. [152]

[150] THE CLIMATE CASE. *SAÚL VS. RWE*. Full Judgment. Disponível em: https://rwe.climatecase.org/sites/default/files/2025-06/Judgement%20OLG%2028_05_2025.pdf. Acesso em 07 Out. 2025.

[151] GRANTHAM RESEARCH INSTITUTE ON CLIMATE CHANGE AND THE ENVIRONMENT. *Luciano Lliuya v. RWE*: a major step forward for climate justice. 09 Jul. 2025. Disponível em: https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/news/luciano-lliuya-v-rwe-a-major-step-forward-for-climate-justice/. Acesso em 07 Out. 2025.

[152] No original: "*It was irrelevant that this is a matter in which a large number of polluters are involved. No monetary claim for compensation was asserted, but rather the claim for elimination of the (impending) impairment converted into a monetary claim. The defendant was only being held liable in relation to its share of responsibility.* [...] *The fact that, according to the plaintiff's submission, the defendant is one emitter in a whole series of industrial CO2 emitters, i.e. one interferer among several, does not prevent the plaintiff from claiming solely against the defendant as the interferer*". (THE CLIMATE CASE. *SAÚL VS. RWE*. Full Judgment. Disponível em:https://rwe.climatecase.org/sites/default/files/2025-06/Judgement%20OLG%2028_05_2025.pdf. Acesso em 07 Out. 2025.)

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

A ação foi rejeitada ao final, por se entender que o risco de inundação da propriedade não alcançava o grau de iminência exigido pelo Código Civil alemão. O Tribunal, contudo, firmou três proposições de relevo para a litigância climática: (i) grandes emissores podem, em princípio, responder civilmente por danos climáticos ocorridos em outros territórios; (ii) a participação relativamente pequena de determinado emissor no total global de emissões não afasta sua responsabilidade jurídica, bastando a demonstração de nexo causal suficientemente concreto; e (iii) a responsabilidade, quando configurada, é proporcional à contribuição do agente.

O que ali obstou o acolhimento do pedido foi a insuficiência da demonstração do risco. Essa é precisamente a distinção relevante em face do caso dos autos: aqui não se postula proteção contra risco futuro de probabilidade reduzida, mas a reparação de dano já consumado, documentado em sua extensão e quantificado por estudo de atribuição de evento específico, publicado em periódico revisado por pares.

É precisamente essa a função dos estudos de atribuição, examinados no subitem seguinte: demonstrar de que modo as mudanças climáticas afetam a frequência e gravidade dos eventos extremos ao redor do mundo e, de modo específico, como as emissões de determinado poluidor alteram a chance de ocorrência de um risco de dano ou resultado danoso individualizado e particularizado.[153]

Também merece destaque o PC 32/2025 da Corte IDH, relevante para se compreender em que termos o entendimento já consolidado no ordenamento jurídico brasileiro sobre a ampliação do nexo de causalidade em demandas ambientais deve ser aplicado aos litígios climáticos. A Corte IDH é clara ao ponderar que, diante da complexidade inerente aos litígios climáticos, a aplicação estrita das disposições gerais sobre produção de provas pode ser um "obstáculo injustificado para o acesso à justiça". Dessa forma, estabelece que a complexidade desses litígios exige que as autoridades judiciais adotem "uma interpretação das regras probatórias conforme os princípios de disponibilidade da prova, cooperação processual, *pro persona*, *pro natura* e *pro actione*." Com isso, a Corte observa que:

[153] DAMACENA, Fernanda Dalla Libera. *Direito dos desastres e compensação climática no Brasil*: limites e potencialidades. Rio de Janeiro: Lumen Juris, 2019, p. 156-160.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

> [o] acesso à justiça exige a adoção de padrões probatórios alternativos que permitam estabelecer a relação causal, com base na melhor ciência disponível, a partir da geração ou tolerância de riscos significativos pela omissão de medidas de prevenção, e a exposição efetiva de pessoas ou grupos a tais riscos, **sem exigir necessariamente a prova de um vínculo causal direto**. **Nesse sentido, este Tribunal chama a atenção para a possibilidade de presumir o vínculo causal entre as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a degradação do sistema climático, assim como entre essa degradação e os riscos que ela gera sobre os sistemas naturais e as pessoas.**[154]

Do exame dos precedentes e do parecer consultivo acima referidos, extrai-se que a coexistência de concausas concorrentes não obsta o acionamento isolado de um dos corresponsáveis. Trata-se, ademais, de conclusão que independe das experiências estrangeiras, já que, no direito brasileiro, **a solidariedade que rege a responsabilidade civil ambiental dispensa o litisconsórcio passivo** e faculta ao autor demandar qualquer dos corresponsáveis, isolada ou conjuntamente.

4.2.5.2 Nexo causal entre o aquecimento global antropogênico e os eventos climáticos extremos no sul do Brasil

A relação entre as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa e o aquecimento global é objeto de consenso científico consolidado[155].

[154] Parágrafos 552 e 553 do PC 32/2025: 552. A Corte observa que, dada a complexidade inerente aos litígios climáticos, a aplicação estrita de certas disposições gerais sobre provas pode constituir um obstáculo injustificado para o acesso efetivo à justiça. Nesse contexto, cabe às autoridades judiciais adotar uma abordagem que leve em consideração as particularidades próprias deste tipo de litígios, como as dificuldades para comprovar a relação causal entre o dano e sua origem, a assimetria no controle e acesso aos meios probatórios — incluindo as provas via satélite — bem como a concentração de informações técnicas em atores com maiores capacidades institucionais ou econômicas. Esses elementos exigem uma interpretação das regras probatórias conforme os princípios de disponibilidade da prova, cooperação processual, pro persona, pro natura e pro actione. 553. Em relação ao primeiro desses aspectos, a Corte observa que o acesso à justiça exige a adoção de padrões probatórios alternativos que permitam estabelecer a relação causal, com base na melhor ciência disponível, a partir da geração ou tolerância de riscos significativos pela omissão de medidas de prevenção, e a exposição efetiva de pessoas ou grupos a tais riscos, sem exigir necessariamente a prova de um vínculo causal direto. Nesse sentido, este Tribunal chama a atenção para a possibilidade de presumir o vínculo causal entre as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a degradação do sistema climático, assim como entre essa degradação e os riscos que ela gera sobre os sistemas naturais e as pessoas.

[155] Disponível em: https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0270467619886266?journalCode=bsta

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)[156] documenta, ao longo de seus relatórios de avaliação, a evolução das emissões antropogênicas e os riscos associados ao aumento da temperatura média global. Em março de 2023, com a divulgação do Relatório Síntese, completou-se o Sexto Relatório de Avaliação (AR6)[157], no qual se assentou que os riscos climáticos aumentam a cada incremento do aquecimento global. Assim, para qualquer nível de aquecimento futuro, muitos riscos relacionados ao clima revelaram-se ainda maiores do que os avaliados no quinto relatório, havendo indicação de que os riscos e os impactos adversos projetados e as perdas e danos relacionados às mudanças do clima aumentarão a cada incremento do aquecimento global. O IPCC ainda destacou que os riscos climáticos e não climáticos vão interagir cada vez mais, criando riscos compostos e em cascata, mais complexos e difíceis de gerir.

Ao esclarecer que a extensão e a magnitude dos impactos das mudanças climáticas eram ainda maiores do que as estimadas em avaliações anteriores, o IPCC tornou a destacar a **relação entre o aquecimento global e a exacerbação de desastres climáticos**[158], desta feita com ***elevado grau de confiança***.

Ocorre que, enquanto as projeções científicas indicavam que o limiar de 1,5º C acima dos padrões pré-industriais provavelmente seria atingido apenas em 2030, a temperatura média global do planeta superou tal umbral em 2024 por 11 meses consecutivos. Esses dados foram confirmados por centros meteorológicos globais, incluindo o serviço europeu Copernicus e a Organização Meteorológica Mundial (WMO, na sigla em inglês)[159].

---

[156] O IPCC foi instituído pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM)no ano de 1988, a fim de avaliar e compilar as informações científicas disponíveis e fornecer relatórios confiáveis e abrangentes aos governos e formuladores de políticas públicas.

[157] Disponível em: https://www.unep.org/pt-br/resources/relatorios/sexto-relatorio-de-avaliacao-do-ipcc-mudanca-climatica-2022

[158] Conforme definição do IPCC (2012), *desastres climáticos* consistem em alterações severas no funcionamento de uma comunidade em razão de eventos físicos perigosos que interagem com condições sociais vulneráveis e que dão causa a efeitos humanos, materiais, econômicos ou ambientais adversos generalizados. Conceito similar é obtido no inciso V, da Lei n. 12.608/12, segundo o qual, *desastres* consistem no "resultado de evento adverso, de origem natural ou induzido pela ação humana, sobre ecossistemas e populações vulneráveis que causa significativos danos humanos, materiais ou ambientais e prejuízos econômicos e sociais"

[159] Disponível em: https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

É, portanto, consenso científico que as emissões antropogênicas de GEE provocam o aquecimento global e contribuem para a intensificação dos eventos climáticos extremos.

Para a individualização das contribuições que integram essa cadeia causal, a Ciência da Atribuição assume papel central, porquanto fornece os instrumentos científicos necessários para identificar a contribuição das atividades humanas para o aquecimento global, quantificar a participação de fontes emissoras específicas e aferir em que medida as mudanças climáticas influenciaram a probabilidade e a intensidade do evento extremo examinado nos autos.

4.2.5.3. Ciência da Atribuição

A ciência da atribuição é um campo de pesquisa dentro da ciência climática "que avalia as contribuições relativas de diferentes fatores para uma mudança ou evento relacionado ao clima".[160] A ciência de atribuição avalia tendências gerais ou eventos específicos em diferentes aspectos do sistema climático da Terra[161] e estabelece ligações entre forçantes climáticas (emissões de GEE), aquecimento global, eventos climáticos e meteorológicos específicos e impactos sobre sistemas naturais e humanos. O termo "atribuição", segundo o IPCC, refere-se ao "processo de avaliar as contribuições relativas de múltiplos fatores causais para uma mudança ou evento, com uma avaliação de confiança".[162]

Registre-se que a avaliação de confiança integra a própria definição do método: a atribuição não produz certeza absoluta, mas conclusões acompanhadas da explicitação de seu grau de confiança e das incertezas associadas o que, longe de fragilizá-la, constitui requisito de rigor metodológico.

---

[160] WALKER-CRAWFORD, Noah, REYES, Jameela Joy; PETKOV, Nicholas; CORNER, Sofia Palazzo. Science in the courtroom: evidentiary needs in climate litigation. 2026, London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science and Grantham Institute – Climate Change and the Environment, Imperial College London. DOI: 10.21953/researchonline.lse.ac.uk.00137472 . P. 11.

[161] WALKER-CRAWFORD, Noah, REYES, Jameela Joy; PETKOV, Nicholas; THEOKRITOFF, Emily. *Constructing the causal chain*: attribution science in polluter pays climate litigation. 2026, London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science and Grantham Institute – Climate Change and the Environment, Imperial College London. Disponível em: https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/constructing-the-causal-chain-attribution-science-in-polluter-pays-climate-litigation/. P. 7.

[162] IPCC. Glossary. In Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability (pp. 2897–2930). Cambridge University Press. Disponível em: https://doi.org/10.1017/9781009325844.029. Acesso: 09 jun. 2026.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

Trata-se de campo da ciência reconhecido e utilizado por tribunais internacionais em seus mais recentes pareceres: o Parecer Consultivo da Corte Internacional de Justiça (CIJ) sobre as obrigações dos Estados em relação às mudanças climáticas, de 23 de julho de 2025, e o Parecer Consultivo PC-32/2025 da Corte IDH sobre emergência climática e direitos humanos.

Pode ser utilizada para identificar e quantificar as causas das mudanças climáticas observadas, seus efeitos e impactos, ou a contribuição de um emissor específico para o aquecimento global[163]. O campo compreende quatro vertentes metodológicas distintas: a atribuição do aquecimento, que relaciona as emissões antropogênicas à elevação da temperatura média global; a atribuição de fontes, que identifica e quantifica a participação de emissores específicos no total acumulado de emissões; a atribuição de eventos, que avalia em que medida o aquecimento alterou a probabilidade e a intensidade de um evento climático determinado; e a atribuição de impactos, que relaciona as alterações climáticas a consequências verificadas sobre sistemas naturais e humanos.

No caso são utilizadas as três primeiras vertentes, detalhadas nos subitens seguintes. A atribuição de impactos não integra o acervo probatório aqui produzido, uma vez que a demonstração dos danos efetivamente verificados no território gaúcho faz-se por prova documental ordinária, objeto do quadro fático.

A atribuição do aquecimento (*warming attributio*n ou *trend attribution)* é a área da ciência de atribuição voltada principalmente a atribuir mudanças detectadas na temperatura global à atividade humana, fornecendo a base probatória para a política climática e fundamentando os primeiros relatórios do IPCC.[164] De forma exemplificativa, essa área de pesquisa analisa a relação entre o dióxido de carbono e outros poluentes e o aquecimento global.

[163] Ibidem. P. 11.

[164] WALKER-CRAWFORD, Noah, REYES, Jameela Joy; PETKOV, Nicholas; THEOKRITOFF, Emily. *Constructing the causal chain*: attribution science in polluter pays climate litigation. 2026, London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science and Grantham Institute – Climate Change and the Environment, Imperial College London. Disponível em: https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/constructing-the-causal-chain-attribution-science-in-polluter-pays-climate-litigation/. P. 7.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

A partir dos anos 2000, pesquisadores da área passaram a estudar as causas de eventos climáticos extremos específicos,[165] desenvolvendo o ramo da Atribuição de Eventos (ou Atribuição de Eventos Extremos, *Physical Hazard Attribution* ou *Physical Event Attribution*). Esse ramo utiliza modelos climáticos e observações meteorológicas para comparar eventos climáticos atuais com um cenário contrafactual estabelecido em níveis de temperatura pré-industriais.[166] Metodologias rigorosas foram desenvolvidas para esse tipo de estudo, que permite que se quantifique e analise como as mudanças climáticas alteraram a probabilidade ou a intensidade de eventos climáticos.[167]

A comparação de cenários analisada por esse ramo da ciência é realizada utilizando dados observacionais e modelos climáticos, podendo gerar conclusões sobre diversos fatores, demonstrando as muitas maneiras pelas quais as mudanças climáticas podem alterar um risco:[168]

> As mudanças climáticas podem alterar a intensidade e magnitude, a frequência, a duração, o momento e a extensão espacial dos perigos climáticos de uma região. Esses termos são explicados abaixo:
> **Magnitude e intensidade:** o valor bruto de um perigo climático, como o aumento da temperatura ou a altura de uma inundação.
> **Frequência:** o número de vezes que um perigo climático atinge ou ultrapassa um limiar em um determinado período, como o número de eventos de neve intensa ou de inundações experimentadas em um ano ou ao longo de uma década.
> **Duração:** o período de tempo durante o qual condições perigosas persistem além de um limiar, como o aumento no número de meses consecutivos de condições de seca ou o número de dias em que um ciclone tropical afeta uma localidade.
> **Momento (ou época de ocorrência):** a ocorrência de um evento perigoso em relação ao curso de um dia, estação, ano ou outro período, como a época do ano em que animais migratórios esperam encontrar uma fonte de alimento sazonal.

---

[165] UNION OF CONCERNED SCIENTISTS. What is attribution science? Cambridge: Union of Concerned Scientists. https:// www.ucs.org/resources/attribution-science. Acesso: 10 jun. 2026.
[166] WALKER-CRAWFORD, Noah, REYES, Jameela Joy; PETKOV, Nicholas; THEOKRITOFF, Emily. *Constructing the causal chain*: attribution science in polluter pays climate litigation. 2026, London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science and Grantham Institute – Climate Change and the Environment, Imperial College London. Disponível em: https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/constructing-the-causal-chain-attribution-science-in-polluter-pays-climate-litigation/ P. 7.
[167] UNION OF CONCERNED SCIENTISTS. What is attribution science? Cambridge: Union of Concerned Scientists. https:// www.ucs.org/resources/attribution-science. Acesso: 10 jun. 2026. e Philip SY, Kew SF, van Oldenborgh GJ, Anslow FS, Seneviratne SI, Vautard R, Coumou D, Ebi KL, Arrighi J, Singh R and van Aalst M (2022) Rapid attribution analysis of the extraordinary heatwave on the Pacific coast of the US and Canada in June 2021. Earth System Dynamics, 13: 1689. https://esd.copernicus.org/articles/13/1689/2022/.
[168] Ibid. p. 16.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

> **Extensão espacial:** a região na qual uma condição perigosa é esperada ou ocorreu, como uma área ameaçada por ciclones tropicais ou o terreno onde há presença de permafrost.
> [Adaptado do Climate Change 2021: The Physical Science Basis do IPCC, página 1.875, FAQ 12.3, "How Will Climate Change Affect the Regional Characteristics of a Climate Hazard?"][169]

Das dimensões acima descritas, a **frequência**, com a conclusão de que eventos dessa natureza se tornaram cerca de duas vezes mais prováveis, e a **intensidade**, com o acréscimo de aproximadamente 12% na magnitude da precipitação, são objeto de demonstração nesta inicial. Registre-se que a demonstração se limita a essas duas dimensões, o que evidencia o caráter conservador do acervo probatório ora produzido.

Outro ramo particularmente relevante para a demanda é a atribuição de fontes (*source attribution*). A atribuição de fontes começou a ser desenvolvida na década de 2010, ampliando o campo da ciência da atribuição para considerar o papel de emissores históricos de GEE específicos nas mudanças climáticas.[170] Originou-se com um artigo que rastreava emissões antropogênicas até produtores de combustíveis fósseis e cimento,[171] e hoje traduz-se por um grande banco de dados utilizado para quantificar as emissões atribuíveis aos maiores emissores do mundo, a base de dados *Carbon Majors*.[172] Essa área de pesquisa permite que seja incluído mais um elo na cadeia causal de análise de causalidade de eventos climáticos induzidos pelas mudanças climáticas:

---

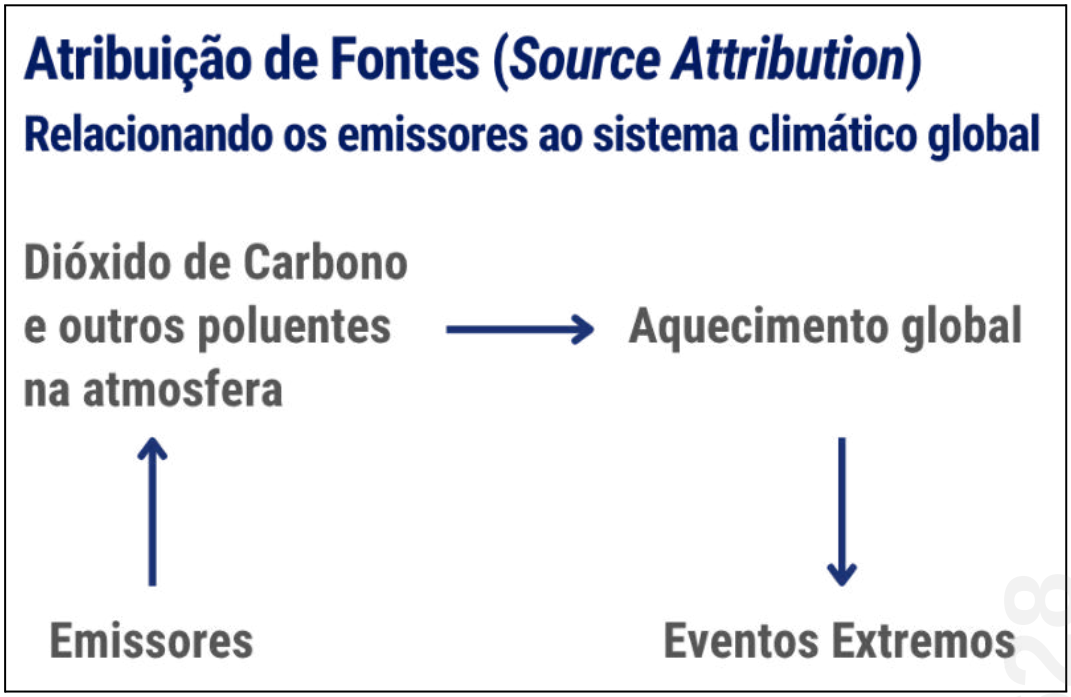
[169] WALKER-CRAWFORD, Noah, REYES, Jameela Joy; PETKOV, Nicholas; THEOKRITOFF, Emily. *Constructing the causal chain*: attribution science in polluter pays climate litigation. 2026, London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science and Grantham Institute – Climate Change and the Environment, Imperial College London. Disponível em: https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/constructing-the-causal-chain-attribution-science-in-polluter-pays-climate-litigation/. P. 17.

[170] Ibid. P. 7.

[171] Ibid. P. 7. e HEEDE, Richard. *Tracing anthropogenic carbon dioxide and methane emissions to fossil fuel and cement producers,* 1854–2010. 2014, Climatic Change, 122(1–2), 229–241. https://doi.org/10.1007/s10584-013-0986-y.

[172] WALKER-CRAWFORD, Noah, REYES, Jameela Joy; PETKOV, Nicholas; THEOKRITOFF, Emily. *Constructing the causal chain*: attribution science in polluter pays climate litigation. 2026, London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science and Grantham Institute – Climate Change and the Environment, Imperial College London. Disponível em: https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/constructing-the-causal-chain-attribution-science-in-polluter-pays-climate-litigation/. P. 7. A base de dados *Carbon Majors* está disponível em https://carbonmajors.org/.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161



Com isso, é possível demonstrar uma cadeia de causalidade ligando a contribuição de um emissor específico a um evento individualizado, tanto em termos de pesquisas acadêmicas e avaliações de políticas públicas, quanto em casos judiciais,[173] o que já é corrente em litígios climáticos estrangeiros.

Nesse aspecto, para os fins da presente demanda, a ciência da atribuição é utilizada para (re)construir o nexo causal, valendo-se de "um modelo probatório de causa e efeito, composto por um conjunto de relações (elos causais) que podem ligar emissores de gases de efeito estufa àqueles que sofrem danos induzidos pelo clima".[174] Os estudos de atribuição constituem o meio adequado, portanto, para "construir essa cadeia causal, conectando factualmente os impactos sofridos pelo requerente às ações do réu".[175]

[173] WALKER-CRAWFORD, Noah, REYES, Jameela Joy; PETKOV, Nicholas; CORNER, Sofia Palazzo. Science in the courtroom: evidentiary needs in climate litigation. 2026, London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science and Grantham Institute – Climate Change and the Environment, Imperial College London. DOI: 10.21953/researchonline.lse.ac.uk.00137472. P. 18 e UNION OF CONCERNED SCIENTISTS. What is attribution science? Cambridge: Union of Concerned Scientists. https://www.ucs.org/resources/attribution-science. Acesso: 10 jun. 2026.

[174] WALKER-CRAWFORD, Noah, REYES, Jameela Joy; PETKOV, Nicholas; CORNER, Sofia Palazzo. Science in the courtroom: evidentiary needs in climate litigation. 2026, London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science and Grantham Institute – Climate Change and the Environment, Imperial College London. DOI: 10.21953/researchonline.lse.ac.uk.00137472. P. 18.

[175] WALKER-CRAWFORD, Noah, REYES, Jameela Joy; PETKOV, Nicholas; CORNER, Sofia Palazzo. Science in the courtroom: evidentiary needs in climate litigation. 2026, London: Grantham Research Institute on

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

A atribuição do aquecimento estabelece a relação entre as emissões antropogênicas e a elevação da temperatura, a atribuição de fontes quantifica a participação de emissores determinados no total acumulado e a atribuição de eventos afere a influência do aquecimento sobre evento específico. A articulação desses resultados para fins de imputação proporcional de responsabilidade constitui operação jurídica, examinada no item 4.2.7, e não conclusão científica autônoma, sendo, contudo, integralmente fundada em dados produzidos segundo a melhor ciência disponível.

A idoneidade dos estudos de ciência climática como meio de prova encontra parâmetros expressos nos pronunciamentos consultivos proferidos no Parecer Consultivo PC-32/2025 da Corte IDH e da CIJ sobre as obrigações dos Estados no contexto das mudanças climáticas, respectivamente:

> 486. A juízo da Corte, para determinar qual é a melhor ciência disponível, os Estados devem considerar, entre outros critérios, se o conhecimento ao seu dispor: (i) é o mais atualizado; (ii) baseia-se em metodologias avaliadas por pares, práticas e padrões científicos reconhecidos internacionalmente, quando tais padrões existirem; (iii) sua divulgação observa processos rigorosos de revisão por pares de alta qualidade ou por organizações equivalentes; (iv) comunica com clareza as incertezas e suposições subjacentes às bases científicas de suas conclusões; (v) é verificável e reproduzível mediante a publicação dos dados e modelos não confidenciais utilizados para chegar às conclusões; (vi) apresenta com precisão suas fontes de informação, fundamentadas na literatura científica relevante, empiricamente comprovada e atualizada, sem omitir, alterar ou deturpar dados e literatura pertinentes; e (vii) deriva suas conclusões com exatidão a partir dos dados disponíveis, sem omitir, alterar ou deturpar resultados relevantes.[176]
>
> 436. [...] **a Corte entende que o padrão de "um nexo causal suficientemente direto e certo" entre uma suposta ação ou omissão ilícita e o suposto dano é suficientemente flexível para enfrentar os desafios decorrentes do fenômeno das mudanças climáticas.**
>
> 437. E**m termos da operação desta norma legal no contexto das mudanças climáticas, a Corte observa que a causalidade envolve dois elementos distintos. Primeiro, se um determinado evento ou tendência climática pode ser atribuído às mudanças climáticas antropogênicas; e segundo, em que medida os danos causados pelas mudanças climáticas podem ser atribuídos a um determinado Estado ou grupo de Estados.** Embora o segundo elemento deva ser estabelecido in concreto em relação a reivindicações específicas apresentadas por Estados em relação a danos, em muitos casos o primeiro elemento pode ser abordado por meio do recurso à ciência. **As evidências científicas apresentadas nestes procedimentos estabelecem que danos significativos ao sistema climático e a**

Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science and Grantham Institute – Climate Change and the Environment, Imperial College London. Disponível em: https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/constructing-the-causal-chain-attribution-science-in-polluter-pays-climate-litigation/. P. 18.

[176] CORTE INTERAMERICANA DE DIREITOS HUMANOS (Corte IDH). Parecer Consultivo PC-32/2025. Emergência Climática e Direitos Humanos. Parágrafo 486.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

> **outras partes do meio ambiente foram causados como resultado das emissões antropogênicas de GEE** (ver parágrafo 277 acima). Por exemplo, o Relatório Síntese de 2023 do IPCC inclui dados que ligam claramente a contribuição humana às mudanças climáticas aos aumentos observados em ondas de calor, inundações e secas (p. 48, figura 2.3). Quanto ao estabelecimento da causalidade entre o dano causado e um ato internacionalmente ilícito, a Corte observou no passado que "[e]m casos de suposto dano ambiental, questões particulares podem surgir com respeito à existência de dano e causalidade. O dano pode ser devido a múltiplas causas concomitantes, ou o estado da ciência sobre o nexo causal entre o ato ilícito e o dano pode ser incerto. Essas são dificuldades que devem ser abordadas à medida que surgem, à luz dos fatos do caso em questão e das evidências apresentadas à Corte. Em última análise, cabe à Corte decidir se existe um nexo causal suficiente entre o ato ilícito e o dano sofrido." (Certain Activities Carried Out by Nicaragua in the Border Area (Costa Rica v. Nicaragua), Compensação, Sentença, I.C.J. Reports 2018 (I), p. 26, parágrafo 34.)
>
> 438. **À luz do exposto, a Corte conclui que, embora o nexo causal entre as ações ou omissões ilícitas de um Estado e o dano decorrente das mudanças climáticas seja mais tênue do que no caso de fontes locais de poluição, isso não significa que a identificação de um nexo causal seja impossível no contexto das mudanças climáticas; significa apenas que o nexo causal deve ser estabelecido em cada caso por meio de uma avaliação in concreto, levando em consideração os elementos mencionados acima, delineados pela Corte**.[177] (tradução livre com grifos postos)

Duas observações são necessárias. A primeira é que o pronunciamento diz respeito à responsabilidade internacional de Estados por atos internacionalmente ilícitos, regida por regime próprio, no qual a exigência de nexo "suficientemente direto e certo" cumpre função distinta da que desempenha na responsabilidade civil ambiental de direito interno, informada pela teoria do risco integral e pelo conceito ampliado de poluidor, nos termos dos arts. 3º, IV, e 14, § 1º, da Lei nº 6.938/1981.

A segunda é que, mesmo sob o padrão ali adotado, a Corte distingue dois elementos da causalidade: a atribuição do evento às mudanças climáticas, que reconhece solucionável pela via científica, e a atribuição dos danos a agente determinado, que remete à demonstração concreta em cada caso. É exatamente essa a estrutura do acervo probatório trazido na inicial, o primeiro elemento é demonstrado pelo estudo de atribuição de evento e o segundo, pela atribuição de fontes, que quantifica a participação individual da demandada nas emissões cumulativas, demonstração *in concreto* que a Corte reputa necessária e possível.

Dessa forma, os Pareceres Consultivos da Corte IDH e da CIJ reforçam que a análise jurídica dos danos climáticos deve ser orientada pela **melhor ciência disponível.** Ao

[177] INTERNATIONAL COURT OF JUSTICE. *23 July 2025 Advisory Opinion.* Obligations of States in Respect of Climate Change. Parágrafos 436, 437 e 438.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

estabelecer critérios para a identificação da melhor ciência disponível, a Corte IDH confere especial relevância a estudos baseados em metodologias reconhecidas, revisão por pares, transparência quanto às incertezas, verificabilidade dos dados e adequada correspondência entre evidências e conclusões.

Esses critérios são precisamente aqueles observados pelos estudos contemporâneos de ciência da atribuição, os quais se baseiam em modelos climáticos, séries observacionais, cenários contrafactuais e avaliação expressa dos graus de confiança e incerteza científica.

A utilização de estudos de atribuição como meio de prova em litígios climáticos é largamente aceita em demandas contra Estados quanto contra agentes econômicos privados. Os casos a seguir arrolados são exemplificativos::

- County of Multnomah v. Exxon Mobil Corp., proposto nos Estados Unidos em 2023, que apresenta estudos de atribuição de eventos e atribuição de fontes, incluindo um parecer de Richard Heede, um dos fundadores do Climate Accountability Institute, instituição que mantém a base de dados *Carbon Majors*[178];
- Held v. State of Montana, caso proposto nos Estados Unidos em 2020, que apresenta estudos de atribuição de fontes, aquecimento e impacto;[179]
- Asmania et al. v. Holcim, proposto na Suíça em 2022, que apresenta estudos de atribuição de fontes com base em relatório do Climate Accountability Institute;[180]

[178] Conforme dados disponíveis em: https://climateattribution.org/attribution/courts/ e https://www.climatecasechart.com/collections/county-of-multnomah-v-exxon-mobil-corp-_3fa2ed. Acesso: 12 jun. 2026.
[179] Conforme dados disponíveis em: https://climateattribution.org/attribution/courts/ e https://www.climatecasechart.com/collections/held-v-state_2e16b7. Acesso: 12 jun. 2026.
[180] Conforme dados disponíveis em:https://climateattribution.org/resources/legal-resource-expert-report-of-richard-heede-asmania-et-al-v-holcim/ e https://www.climatecasechart.com/document/asmania-et-al-vs-holcim_f2ce?q=asmania+. Acesso: 12 jun. 2026.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

- Verein KlimaSeniorinnen Schweiz and Others v. Switzerland, proposto na Corte Europeia de Direitos Humanos em 2020, apresentando estudo sobre atribuição de fonte;[181]

- IEA vs. União Federal (Desmatamento e direito fundamental à estabilidade climática)[182] (Institute of Amazonian Studies v. Brazil), proposto em 2020 perante a Justiça Federal do Paraná, que apresenta estudos de atribuição de impacto e de fontes.[183]

- Lliuya v. RWE, proposto na Alemanha em 2015,[184] que apresenta estudo de atribuição de fonte, com base na plataforma *Carbon Majors*[185] e atribuição de evento;[186]

- Casquejo and others v Shell plc and another (the Odette Case), proposto no Reino Unido em 2025,[187] e apresenta estudo de atribuição de evento com metodologia probabilística de autoria de Ben Clarke e outros especialistas;[188]

[181] Conforme dados disponíveis em: https://climateattribution.org/resources/legal-resource-third-party-intervention-of-experts-verein-klimaseniorinnen-schweiz-and-others-v-switzerland/ e https://www.climatecasechart.com/document/verein-klimaseniorinnen-schweiz-and-others-v-switzerland_6852?q=KlimaSeniorinnen. Acesso: 12 jun. 2026.

[182] Sobre o caso, ver seu cadastro na Plataforma de Litigância Climática no Brasil, disponível em https://plataformajuma.jur.puc-rio.br/

[183] Conforme dados disponíveis em: https://climateattribution.org/resources/legal-resource-supporting-technical-report-of-dr-carlos-afonso-nobre-institute-of-amazonian-studies-v-brazil/ e https://www.climatecasechart.com/document/institute-of-amazonian-studies-v-brazil_4826?q=Amazonian+Studies+v.+Brazil. Acesso: 12 jun. 2026.

[184] Informações sobre o caso disponíveis em: https://www.climatecasechart.com/document/luciano-lliuya-v-rwe-ag_dd33?q=lliuya e https://rwe.climatecase.org/en. Acesso: 12 jun. 2026.

[185] Carbon Majors: 2024 Data Update. An InfluenceMap Briefing. Disponível em: https://carbonmajors.org/briefing/Carbon-Majors-2024-Data-Update-35466. Acesso: 10 jun. 2026.

[186] Estudo publicado na revista *Nature Geoscience* e disponível em: https://www.nature.com/articles/s41561-021-00686-4. Acesso: 12 jun. 2026.

[187] Informações sobre o caso disponíveis em: https://www.climatecasechart.com/document/casquejo-and-others-v-shell-plc-and-another-the-odette-case_1afd?l=united-kingdom e https://www.odettecase.org/about. Acesso: 12 jun. 2026.

[188] Estudo publicado na EGUsphere e disponível em: https://egusphere.copernicus.org/preprints/2025/egusphere-2025-665/. Acesso: 12 jun. 2026.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

10213428628

- Ma et al. v. KEPCO et. al, proposto na Coreia do Sul em 2025,[189] que se baseia em estudos de atribuição de evento e impactos;[190]

- Carbon Majors Inquiry, proposto em 2015 e decidido pela Comissão Filipina de Direitos Humanos com base em estudos de atribuição de fonte e utilizando a base *Carbon Majors*;[191] e

- Greenpeace Italy v. ENI, proposto na Itália em 2023 e que contém estudos de atribuição de fonte, incluindo um relatório apresentado pelo Dr. Richard Heede e estudos de atribuição de eventos.[192]

A presente demanda, assim, ancora-se nas conclusões da melhor ciência disponível, aplicando ao caso concreto a ciência da atribuição.

No caso, promove-se a utilização cumulativa e integrada de diferentes abordagens metodológicas que dialogam entre si e permitem a reconstrução da cadeia causal climática em suas diversas etapas, as quais serão melhor explicadas a seguir:

1. Atribuição do Aquecimento, ou *Warming Attribution/Trend Attribution,* consolidada especialmente nas conclusões do IPCC, em particular no Sexto Relatório de Avaliação (AR6), que demonstra a influência dominante das atividades humanas no aquecimento global observado e na alteração do sistema climático;

2. Atribuição de Fontes, ou *Source Attribution*, a partir da plataforma *Carbon Majors*, base de dados de metodologia consolidada que permite quantificar a contribuição histórica dos grandes produtores de combustíveis fósseis e cimento para as emissões globais de GEE. Trata-se de abordagem que permite

[189] Informações sobre o caso disponíveis em: https://www.climatecasechart.com/document/ma-et-al-v-kepco-et-al_cbd7?l=south-korea&q=Korea+Electric+Power+Corporation. Acesso: 12 jun. 2026.
[190] Estudos disponíveis em: https://www.nature.com/articles/s41586-025-08751-3/. e https://forourclimate.org/ko/research/600. Acesso: 12 jun. 2026.
[191] Informações sobre o caso disponíveis em: https://www.climatecasechart.com/document/in-re-greenpeace-southeast-asia-and-others_a98d. Acesso: 12 jun. 2026.
[192] Informações sobre o caso e estudos apresentados disponíveis em: https://www.climatecasechart.com/document/greenpeace-italy-et-al-v-eni-s-p-a-the-italian-ministry-of-economy-and-finance-and-cassa-depositi-e-prestiti-s-p-a_d341 e https://www.greenpeace.org/italy/rapporto/17711/lagiustacausa-leggi-tutti-i-documenti/. Acesso: 12 jun. 2026.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

individualizar, dentro do fenômeno climático global, a contribuição de grandes emissores para o agravamento da crise climática; e

3. Atribuição de Eventos ou *Physical Hazard Attribution/Physical Event Attribution*, com base no estudo de Clarke et al. sobre os eventos extremos de precipitação que afetaram o Rio Grande do Sul em 2024. O referido estudo permite avaliar em que medida o aquecimento global antropogênico tornou eventos semelhantes mais prováveis e mais intensos e configura prova central do nexo de causalidade entre as mudanças climáticas e a ocorrência do evento objeto da presente demanda.

A análise conjunta e sinérgica dos estudos de atribuição permite demonstrar que **(i) as emissões antropogênicas causaram o aquecimento global, que (ii) que a participação da demandada é mensurável nas emissões e que (iii) o aquecimento global ampliou a probabilidade e a intensidade de eventos extremos como especificamente o que atingiu o estado gaúcho em 2024**.

4.2.5.3.1 Atribuição do Aquecimento (*Warming Attribution* ou *Trend Attribution)*

Constitui consenso científico que o aquecimento global contemporâneo decorre das emissões antropogênicas de GEE e que a elevação da temperatura média intensifica os riscos climáticos e a ocorrência de eventos extremos. A primeira etapa da reconstrução da cadeia causal objeto desta demanda consiste, portanto, na **Atribuição do Aquecimento (*Warming Attribution* ou *Trend Attribution*)**, realizada com fundamento nas conclusões consolidadas pelo IPCC, especialmente em seu Sexto Relatório de Avaliação (AR6). Essa abordagem permite identificar e quantificar a influência humana sobre o aquecimento observado, distinguindo-a da variabilidade natural do clima e estabelecendo o primeiro elo entre as emissões antropogênicas e o desequilíbrio do sistema climático que favoreceu o agravamento dos eventos extremos ocorridos no Rio Grande do Sul.

Em suas avaliações, o IPCC determina o estado do conhecimento sobre as mudanças climáticas, identificando onde há consenso na comunidade científica sobre tópicos relacionados às mudanças climáticas e onde são necessárias mais pesquisas. Os relatórios são

10213428628

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

redigidos e revisados em várias etapas, garantindo objetividade e transparência. O IPCC não conduz suas próprias pesquisas, mas avalia as publicações científicas disponíveis para chegar às conclusões sobre o estado da ciência climática.

Os relatórios do IPCC são neutros e relevantes para políticas públicas, sendo uma contribuição fundamental para as negociações internacionais destinadas a enfrentar as mudanças climáticas.[193] Ademais, os Relatórios de Avaliação passam por uma revisão extensiva por parte de especialistas e governos antes de serem aceitos ou adotados pelo Grupo de Trabalho relevante ou pela sessão plenária do IPCC. As conclusões do IPCC são formuladas como declarações factuais ou associadas a um nível de confiança avaliado.[194]

Conforme expresso em seus relatórios,[195] **a linguagem calibrada do IPCC utiliza cinco qualificadores para expressar um nível de confiança: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto**. Os seguintes **termos** são usados para indicar a probabilidade avaliada de uma consequência ou resultado: **virtualmente certo (*virtually certain*) 99-100% de probabilidade, muito provável (*very likely*) 90-100%, provável (*likely*) 66-100%, mais provável do que improvável (*more likely than not*) > 50-100%, tanto provável quanto improvável (*about as likely as not*) 33-66%, improvável (*unlikely*) 0-33%, muito improvável *(very unlikely*) 0-10%, excepcionalmente improvável (exceptionally unlikely) 0-1%.** Termos adicionais (extremamente provável 95-100%; e extremamente improvável 0-5%) também são usados quando apropriado.

Durante o sexto ciclo de avaliação (outubro de 2015 a julho de 2023), o IPCC produziu o AR6 culminando em um Relatório Síntese, publicado em 2023 e traduzido pelo Governo Federal brasileiro para o português.[196] Ele sintetiza e integra os materiais contidos nos três Relatórios de Avaliação dos Grupos de Trabalho.[197] Nesta publicação, é evidenciado

[193] IPCC. The Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: https://www.ipcc.ch/. Acesso: 09 jun. 2026.
[194] INTERNATIONAL COURT OF JUSTICE. *23 July 2025 Advisory Opinion.* Obligations of States in Respect of Climate Change. Parágrafo 60.
[195] IPCC. Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese. Disponível em:https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. P. 19. Acesso: 09 jun. 2026.
[196] Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso: 10 jun. 2026.
[197] IPCC. Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso: 09 jun. 2026.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

o consenso científico de que as atividades humanas causam o aquecimento global e que o aumento da concentração de GEE na atmosfera desde 1750 é inequivocamente causado por elas:

> A. Situação Atual e Tendências
>
> Aquecimento Observado e suas Causas
> A.1 **As atividades humanas, principalmente através das emissões de gases de efeito estufa, inequivocamente causaram o aquecimento global, com a temperatura da superfície global atingindo um valor 1,1°C mais alto entre 2011-2020 do que no período de 1850-1900.** As emissões globais de gases de efeito estufa continuaram a aumentar, com contribuições históricas e contínuas desiguais decorrentes do uso insustentável de energia, do uso da terra e da mudança no uso da terra, dos estilos de vida e dos padrões de consumo e produção entre regiões, entre países e dentro deles, e entre indivíduos (alta confiança).
> [...]
> A.1.3 **Os aumentos observados em concentrações de GEE misturados de forma homogênea desde cerca de 1750 são inequivocamente causados por emissões de GEE de atividades humanas durante esse período.** As emissões líquidas acumuladas históricas de CO2 de 1850 a 2019 foram de 2.400 ± 240 GtCO2 das quais mais da metade (58%) ocorreram entre 1850 e 1989 e cerca de 42% ocorreram entre 1990 e 2019 (alta confiança). Em 2019, as concentrações atmosféricas de CO2 (410 partes por milhão) foram mais altas do que em qualquer período em pelo menos 2 milhões de anos (alta confiança), e as concentrações de metano (1866 partes por bilhão) e óxido nitroso (332 partes por bilhão) foram mais altas do que em qualquer momento em pelo menos 800.000 anos (confiança muito alta).[198] (grifos postos)

O AR6 também evidenciou, com alta confiança, que **a mudança climática antropogênica já está afetando a ocorrência de eventos climáticos extremos em todas as regiões do mundo**:

> Mudanças e Impactos Observados
> A.2 Ocorreram mudanças generalizadas e rápidas na atmosfera, oceano, criosfera e biosfera. **A mudança do clima causada pelo homem já está afetando muitos extremos climáticos e meteorológicos em todas as regiões do mundo.** Isto vem resultando em impactos adversos generalizados, e perdas e danos relacionados, à natureza e às pessoas (alta confiança). Comunidades vulneráveis que menos contribuíram historicamente para a mudança atual do clima são afetadas de forma desproporcional (alta confiança). {2.1, Tabela 2.1, Figura 2.2, Figura 2.3} (Figura SPM.1)
>
> A.2.1 **É inequívoco que a influência humana aqueceu a atmosfera, o oceano e a terra.** O nível médio global do mar aumentou em 0,20 [0,15 a 0,25] m entre 1901 e 2018. A taxa média de elevação do nível do mar foi de 1,3 [0,6 a 2,1] mm ano-1 entre 1901 e 1971, aumentando para 1,9 [0,8 a 2,9] mm ano-1 entre 1971 e 2006, e aumentando ainda mais para 3,7 [3,2 a 4,2] mm ano-1 entre 2006 e 2018 (alta confiança). A influência humana foi muito provavelmente o fator principal destes aumentos desde pelo menos 1971. **As evidências das mudanças observadas em**

[198] IPCC. Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese. Disponível em:https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. P. 20. Acesso: 09 jun. 2026.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

extremos como ondas de calor, precipitações intensas, secas e ciclones tropicais e, em particular, sua atribuição à influência humana, se fortaleceram ainda mais desde o AR5. A influência humana provavelmente aumentou a probabilidade de eventos extremos compostos desde a década de 1950, incluindo aumentos na frequência de ondas de calor e secas simultâneas (alta confiança). {2.1.2, Tabela 2.1, Figura 2.3, Figura 3.4} (Figura SPM.1)

[...]

Seção 2: Situação Atual e Tendências
2.1 Mudanças Observadas, Impactos e Atribuições

As atividades humanas, principalmente através das emissões de gases de efeito estufa, inequivocamente causaram o aquecimento global, com a temperatura da superfície global atingindo um valor 1,1ºC mais alto entre 2011-2020 do que no período de 1850-1900. As emissões globais de gases de efeito estufa continuaram a aumentar no período de 2010 a 2019, com contribuições históricas e correntes desiguais decorrentes do uso insustentável de energia, do uso da terra e da mudança no uso da terra, dos estilos de vida e dos padrões de consumo e produção entre regiões, entre países e dentro deles, e entre indivíduos (alta confiança). As mudanças do clima causadas pelo homem já estão afetando muitos extremos meteorológicos e climáticos em todas as regiões do mundo. Isso levou a impactos adversos difundidos na segurança alimentar e hídrica, na saúde humana, na economia e na sociedade, bem como perdas e danos relacionados6 à natureza e às pessoas (alta confiança). As comunidades vulneráveis que historicamente menos contribuíram para a mudança do clima atual são desproporcionalmente afetadas (alta confiança).[199] (grifos postos)

[...]

A frequência e a intensidade dos eventos de precipitação intensa aumentaram desde a década de 1950 na maioria das áreas terrestres para as quais os dados observacionais são suficientes para a análise de tendências (alta confiança), e a mudança do clima causada pelo ser humano é provavelmente o principal agente causador (Figura 2.3).[...][200] (grifos postos).

Importante salientar que os relatórios do IPCC são fontes para decisão de tribunais estrangeiros e internacionais e raramente são questionados como fontes legítimas de evidências[201]. O Parecer Consultivo da CIJ sobre as obrigações dos Estados no contexto das mudanças climáticas[202] reconhece que **o IPCC compila a melhor ciência disponível sobre**

[199] IPCC. Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. P. 60. Acesso: 09 jun. 2026.

[200] IPCC. Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. P. 64. Acesso: 09 jun. 2026.

[201] WALKER-CRAWFORD, Noah, REYES, Jameela Joy; PETKOV, Nicholas, CORNER, Sofia Palazzo. *Science in the courtroom:* evidentiary needs in climate litigation. 2026, London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science and Grantham Institute – Climate Change and the Environment, Imperial College London. DOI: 10.21953/researchonline.lse.ac.uk.00137472. P. 8.

[202] INTERNATIONAL COURT OF JUSTICE. *23 July 2025 Advisory Opinion.* Obligations of States in Respect of Climate Change.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

mudanças climáticas e referencia as conclusões de todos os relatórios publicados no AR6 por todo o seu parecer:

> Contexto da adoção da resolução 77/276 — Consequências graves e de grande alcance das mudanças climáticas — Etapas mais relevantes adotadas de 1968 a 2015 no nível internacional para identificar riscos a fim de proteger o sistema climático e outras partes do meio ambiente — Antecedentes científicos relevantes — **Relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) constituem a melhor ciência disponível sobre as causas, a natureza e as consequências das mudanças climáticas** — Conclusões do IPCC sobre as causas e consequências das mudanças climáticas — Emissões de gases de efeito estufa (GEE) e mudanças climáticas — Medidas de mitigação e adaptação.[203] (grifos postos)
> [...]
> (ii) Informação científica e tecnológica
> [...]
> 284. O padrão de diligência devida pode também tornar-se mais exigente à luz de novos conhecimentos científicos ou tecnológicos. **A Corte está ciente de que a pesquisa científica sobre mudanças climáticas é bem desenvolvida. A esse respeito, os relatórios do IPCC constituem reafirmações abrangentes e autorizadas da melhor ciência disponível sobre mudanças climáticas no momento de sua publicação** (ver parágrafos 74, 77-83 e 277-279 acima).[204] (grifos postos)

Em mesmo sentido, posiciona-se a Corte IDH em seu Parecer Consultivo PC-32/2025:

> 487. Nesse sentido, este Tribunal reitera, nos mesmos termos considerados por outros tribunais internacionais,861 que, **atualmente, a melhor ciência disponível em matéria de mudanças climáticas encontra-se compilada nos relatórios do IPCC** (par. 33 supra).[205] (grifos postos)

[203] Tradução livre. Na ementa do original: *"Context of the adoption of resolution 77/276 — Severe and far-reaching consequences of climate change — Most relevant steps taken from 1968 to 2015 at international level to identify risks in order to protect climate system and other parts of the environment — Relevant scientific background — Reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) constitute the best available science on the causes, nature and consequences of climate change — Findings of the IPCC on the causes and consequences of climate change — Greenhouse gas (GHG) emissions and climate change — Mitigation and adaptation measures."* INTERNATIONAL COURT OF JUSTICE. *23 July 2025 Advisory Opinion.* Obligations of States in Respect of Climate Change. Ementa.

[204] Tradução livre. No original: (ii) Scientific and technological information [...] 284. The standard of due diligence may also become more demanding in the light of new scientific or technological knowledge. The Court is aware that scientific research on climate change is well developed. In this regard, reports by the IPCC constitute comprehensive and authoritative restatements of the best available science about climate change at the time of their publication (see paragraphs 74, 77-83 and 277-279 above). INTERNATIONAL COURT OF JUSTICE. *23 July 2025 Advisory Opinion.* Obligations of States in Respect of Climate Change. Parágrafo 284.

[205] CORTE INTERAMERICANA DE DIREITOS HUMANOS (Corte IDH). Parecer Consultivo PC-32/2025. Emergência Climática e Direitos Humanos. Parágrafo 487.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

12134263

Encontra-se, assim, demonstrado o primeiro elo da cadeia causal. As atividades humanas, principalmente por meio das emissões de gases de efeito estufa, inequivocamente causaram o aquecimento global, elevando a temperatura média da superfície em 1,1°C entre 2011 e 2020 relativamente ao período 1850-1900, e a mudança do clima causada pelo ser humano é o principal agente causador do aumento da frequência e da intensidade das precipitações intensas observado desde a década de 1950.

Estabelecida a relação entre as emissões antropogênicas e o aquecimento global, cumpre avançar para a individualização das contribuições que integram esse conjunto.

4.2.5.3.2 Atribuição de Fontes (*Source Attribution*)

A área da ciência climática de Atribuição de Fonte permite identificar as contribuições relativas a diferentes setores, atividades e entidades para as mudanças climáticas.

O principal recurso disponível para esse fim, disponível de forma pública e gratuita, é o Banco de Dados *Carbon Majors*[206], além dos relatórios publicados pela iniciativa, sendo o mais recente deles o *Carbon Majors: 2024 Data Update*,[207] publicado em janeiro de 2026.

A idoneidade técnica da base decorre de quatro elementos. Sua metodologia é pública, documentada e replicável, com critérios e dados disponíveis para verificação independente. Deriva de trabalho acadêmico revisado por pares, publicado em periódico científico, e não de estimativa produzida para fins litigiosos. É atualizada anualmente e utilizada em pesquisas acadêmicas, formulação legislativa e contextos regulatórios e financeiros em diversas jurisdições. E foi expressamente acolhida pela Corte Interamericana de Direitos Humanos no Parecer Consultivo PC-32/2025, que a qualificou como a fonte de dados mais utilizada sobre as emissões históricas de gases de efeito estufa das empresas, registrando que seus dados são gerados a partir de métodos revisados por pares científicos.

Com o avanço da ciência da atribuição, é possível individualizar "***com a devida acurácia técnica, a parcela que diferentes setores, atividades e entidades (públicas ou***

[206] A base de dados Carbon Majors está disponível em https://carbonmajors.org/.
[207] Disponível em: https://carbonmajors.org/briefing/Carbon-Majors-2024-Data-Update-35466.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

privadas) contribuem, já contribuíram ou pretendem contribuir no somatório das emissões cumulativas à atmosfera, assim como na supressão de sumidouros de carbono"[208], e consequentemente, determinar quais as causas são juridicamente determinantes à imputação da responsabilização jurídica.

Quanto à chamada "ciência de atribuição de fonte emissora", leciona Rafaela Santos Martins da Rosa:

> Os estudos científicos de atribuição de fontes contam com diferentes tipos de evidências, que vão desde registros documentais de emissões de gases de efeito estufa, a partir dos inventários públicos e privados que anotam o histórico compilado de emissões de determinada fonte, mas atualmente já culminam com a possibilidade de monitoramento, em tempo real, das emissões geradas pelas atividades humanas em determinado empreendimento. [...] As evidências documentais referem-se a informações contidas em documentos e relatórios oficiais tornados públicos. Para fins de atribuição de fonte, as principais fontes de evidência documental incluem inventários públicos e privados de emissões de GEE, divulgações de títulos e outros relatórios preparados por governos e também por atores privados detalhando as emissões de GEE, assim como os reflexos do sequestro de carbono de uma determinada atividade ou fonte no cômputo final inventariado, ou seja, o quanto ela supostamente é hábil a compensar de alguma forma as emissões geradas pelas suas atividades.[209]

Cumpre destacar que as evidências documentais de que se vale a atribuição de fontes provêm, em medida substancial, dos próprios dados de produção divulgados pelas companhias em relatórios anuais, prospectos e comunicações a investidores e autoridades reguladoras. Eventual impugnação aos dados implicaria, portanto, contestar as informações que a própria demandada e o grupo econômico de que integra tornaram públicas.

O *Carbon Majors* foi lançado em 2013 por Richard Heede,[210] do *Climate Accountability Institute* (CAI) e trata-se de banco de dados de produção histórica de 178 dos maiores produtores mundiais de petróleo, gás, carvão e cimento, os chamados *Carbon Majors*, cujos registros são utilizados para quantificar as emissões operacionais diretas e as emissões provenientes da combustão de produtos comercializados que podem ser atribuídas a

---

[208] ROSA, Rafaela Martins Santos da. Dano Climático : conceito, pressupostos e responsabilização. 1ª ed. São Paulo : Tirant lo Blanch, 2023. pp. 373-374.
[209] Ibidem, p. 374.
[210] Para mais informações sobre a metodologia, incluindo discussões sobre o protocolo de contabilização, cálculo dos fatores de emissão, atribuição histórica, incertezas, etc. ver HEEDE, Richard. Carbon Majors: Accounting for Carbon and Methane Emissions 1854–2010, Methods & Results Report. 2014. Disponível em: https://climateaccountability.org/wp-content/uploads/2020/12/MRR-9.1-Apr14R.pdf,

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

essas entidades.[211] Os dados são atualizados anualmente, retrocedem ao ano de 1854 e cobrem mais de 1,44 trilhão de toneladas de CO2e (CO2 equivalente), cobrindo 70% das emissões globais de combustíveis fósseis e cimento desde o início da Revolução Industrial em 1751.[212]

A metodologia[213] empregada é integralmente divulgada pela iniciativa, permitindo a verificação independente dos percentuais de emissões históricas atribuíveis a cada entidade avaliada, ordenadas segundo o total de emissões de CO2:[214]

Name	Commodities Produced	Region	Total Emissions ($MtCO_2e$)
Former Soviet Union (1900-1991) Nation State	Coal, Oil & Natural Gas Liquids, Natural Gas	Former Soviet Union	135,113 1st
China (Coal, 1945-2004) Nation State	Coal	China	104,888 2nd
Saudi Aramco State-owned Entity	Oil & Natural Gas Liquids, Natural Gas	Saudi Arabia	72,457 3rd
Chevron Investor-owned Company	Coal, Oil & Natural Gas Liquids, Natural Gas	USA	62,503 4th
ExxonMobil Investor-owned Company	Coal, Oil & Natural Gas Liquids, Natural Gas	USA	57,458 5th
Gazprom State-owned Entity	Oil & Natural Gas Liquids, Natural Gas	Russian Federation	53,116 6th
National Iranian Oil Company State-owned Entity	Oil & Natural Gas Liquids, Natural Gas	Iran	45,826 7th
BP Investor-owned Company	Coal, Oil & Natural Gas Liquids, Natural Gas	UK	43,231 8th
Shell Investor-owned Company	Coal, Oil & Natural Gas Liquids, Natural Gas	UK	41,517 9th
Coal India State-owned Entity	Coal	India	35,221 10th

Fonte: Base de Dados *Carbon Majors*, 2026.

Conforme demonstrado na base de dados, **a Shell ocupa a nona posição no *ranking* de entidades emissoras de GEE históricas e considerando o universo das empresas exclusivamente de capital privado, a ré ocupa a quarta posição mundial.** O relatório *Carbon Majors: 2024 Data Update,* publicado em janeiro de 2026,[215] demonstra que **as**

[211] Conforme informação disponível na página inicial do *Carbon Majors*, acessível em: https://carbonmajors.org/index.html.
[212] Conforme informação disponível na página inicial do *Carbon Majors*, acessível em: https://carbonmajors.org/index.html.
[213] Disponível em: https://carbonmajors.org/Methodology.
[214] Disponível em: https://carbonmajors.org/Entities.
[215] Disponível em: https://carbonmajors.org/briefing/Carbon-Majors-2024-Data-Update-35466.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

emissões da Shell correspondem a 2.02% de todas as emissões globais de combustíveis fósseis e cimento desde o início de 1854 a 2024 contabilizadas pelo *Carbon Majors*:

Table 2: Top 20 Carbon Majors Entities by Emissions (1854–2024)

Entity	Total emissions ($MtCO_2e$)	CO_2 emissions ($MtCO_2$)	Percentage of global CO_2 emissions
Former Soviet Union (1900–1991)	135,113	120,875	6.54%
China (Coal, 1945–2004)	104,888	94,242	5.10%
Saudi Aramco	72,457	67,708	3.66%
Chevron	62,503	56,915	3.08%
ExxonMobil	57,458	51,653	2.79%
Gazprom	53,116	43,034	2.33%
National Iranian Oil Company	45,826	41,645	2.25%
BP	43,231	39,397	2.13%
Shell	41,517	37,267	2.02%

Fonte: *Carbon Majors: 2024 Data Update*, 2026.

O dado assume especial relevo quando confrontado com a relação estabelecida pelo Sexto Relatório de Avaliação do IPCC, segundo a qual, para cada 1.000 GtCO2 emitidos pela atividade humana, a temperatura média global sobe provavelmente entre 0,27 °C e 0,63 °C, com melhor estimativa de 0,45 °C[216]. Historicamente, a demandada emitiu 41.517 MtCO2e, volume que, observadas as ressalvas quanto à comparabilidade entre CO2 e CO2 equivalente, permite dimensionar sua contribuição individual para a elevação da temperatura média global em fração mensurável de grau Celsius.

Encontra-se, assim, demonstrado o segundo elo da cadeia causal. A atribuição de fontes permite individualizar, dentro do conjunto das emissões antropogênicas, a participação de entidades determinadas e, quanto à demandada, essa participação é de 2,02% de todas as emissões globais de CO2 provenientes de combustíveis fósseis e cimento desde 1854,

[216] IPCC. Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese. Disponível em:https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. P. 100. Acesso: 24 jun. 2026.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

correspondentes a 41.517 MtCO2e, o que a posiciona em nono lugar entre todas as entidades avaliadas, em sétimo entre as empresas e entre as cinco maiores produtoras privadas do mundo.

4.2.5.3.3 Atribuição de Eventos (ou Atribuição de Eventos Extremos, *Physical Hazard Attribution* ou *Physical Event Attribution*)

As pesquisas de ciência climática sobre atribuição de eventos podem ser utilizadas para demonstrar um vínculo claro entre as mudanças climáticas causadas pelas emissões antrópicas de gases de efeito estufa e um evento específico. Para o estudo da ocorrência de eventos climáticos extremos, a principal metodologia científica utilizada é a **probabilística**[217].

Trata-se de abordagem que se propõe a comparar, a partir de dados observacionais e modelos climáticos, dois cenários: o mundo factual, no qual um evento climático ocorreu, e um mundo contrafactual, sem as mudanças climáticas antropogênicas.[218]

Em síntese, busca responder à seguinte pergunta:

> **"Quais são as chances ou probabilidades de ocorrência de uma determinada classe de eventos meteorológicos, dadas as mudanças climáticas em comparação com o clima histórico pré-industrial ou contrafactual?"**[219]

---

[217] WALKER-CRAWFORD, Noah, REYES, Jameela Joy; PETKOV, Nicholas; THEOKRITOFF, Emily. *Constructing the causal chain*: attribution science in polluter pays climate litigation. 2026, London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science and Grantham Institute – Climate Change and the Environment, Imperial College London. Disponível em: https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/constructing-the-causal-chain-attribution-science-in-polluter-pays-climate-litigation/. P. 15-16.

[218] WALKER-CRAWFORD, Noah, REYES, Jameela Joy; PETKOV, Nicholas; THEOKRITOFF, Emily. *Constructing the causal chain*: attribution science in polluter pays climate litigation. 2026, London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science and Grantham Institute – Climate Change and the Environment, Imperial College London. Disponível em: https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/constructing-the-causal-chain-attribution-science-in-polluter-pays-climate-litigation/. P. 16. e MINNEROP, Petra; OTTO, Friederike. Climate Change and Causation: Joining Law and Climate Science on the Basis of Formal Logic. Buffalo Environmental Law Journal, vol. 27, 2020. Disponível em: https://digitalcommons.law.buffalo.edu/belj/vol27/iss1/2. P. 68.

[219] LLOYD, Elisabeth A.; ORESKES, Naomi. Climate Change Attribution: When Is It Appropriate to Accept New Methods?. Earth'sFuture, 6, 311-325, 2018. DOI: https://doi. org/10.1002/2017EF000665. P. 313.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

A comparação contrafactual tem consequência decisiva para o deslinde da controvérsia. No cenário contrafactual, todas as condições que não decorrem da influência antropogênica são mantidas constantes: o relevo, a declividade e a profundidade dos solos, os padrões naturais de circulação atmosférica, a ocupação do território e o estado da infraestrutura. Altera-se, exclusivamente, o forçamento antropogênico. Daí resulta que os fatores estruturais e naturais eventualmente invocados como causas do desastre, a suscetibilidade geomorfológica do território gaúcho, a variabilidade climática natural, as condições de ocupação urbana ou as deficiências de infraestrutura, encontram-se presentes em ambos os cenários comparados e, por isso mesmo, não explicam a diferença entre eles. A diferença mede, precisamente, a contribuição do aquecimento global antropogênico.

A literatura especializada indica que **essa abordagem é a mais tradicional e conservadora**[220], na medida em que adota critérios rigorosos para a identificação do sinal das mudanças climáticas e para a quantificação de sua influência sobre o evento analisado. Diante das incertezas inerentes aos modelos e aos dados disponíveis, tende a **estimar de forma mais cautelosa a magnitude do efeito climático**, podendo, em determinadas situações, inclusive, subestimar sua intensidade. Os resultados obtidos constituem piso, e não teto, da contribuição real do aquecimento, a modéstia dos valores apurados é atributo do rigor metodológico, e não indício de fragilidade da conclusão e a opção pela abordagem probabilística, em detrimento da abordagem narrativa (*storyline*), igualmente legítima e complementar[221], decorreu precisamente de sua natureza mais conservadora.

Desenvolveram-se, ainda, métodos de atribuição rápida, permitindo que os cientistas avaliem o papel das mudanças climáticas imediatamente após a ocorrência de um evento, sendo o *World Weather Attribution* (WWA) o organismo mais proeminente que aplica tal abordagem.[222] A iniciativa foi formada em 2014 pelo Dr. Geert Jan van Oldenborgh e pela

---

[220] LLOYD, Elisabeth A.; ORESKES, Naomi. Climate Change Attribution: When Is It Appropriate to Accept New Methods?. Earth'sFuture, 6, 311-325, 2018. DOI: https://doi. org/10.1002/2017EF000665. P. 316 e 319. e OTTO, Friederike E. L. Attribution of Extreme Events to Climate Change. Annu.Rev.Environ.Resour.2023.48:813–28. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112621083538. P. 818.

[221] OTTO, Friederike E. L. Attribution of Extreme Events to Climate Change. Annu.Rev.Environ.Resour. 2023.48:813–28. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112621083538. P. 823. e LLOYD, Elisabeth A.; ORESKES, Naomi. Climate Change Attribution: When Is It Appropriate to Accept New Methods?. Earth'sFuture, 6, 311-325, 2018. DOI: https://doi. org/10.1002/2017EF000665. P. 311.

[222] WALKER-CRAWFORD, Noah, REYES, Jameela Joy; PETKOV, Nicholas; THEOKRITOFF, Emily. *Constructing the causal chain*: attribution science in polluter pays climate litigation. 2026, London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

Dra. Friederike Otto, tendo sido desenvolvido um método revisado por pares (*peer-reviewed*) em publicações metodológicas, que envolve várias etapas para analisar um evento extremo e determinar se, e em que medida, o evento climático extremo foi influenciado pelas mudanças climáticas[223]. Cumpre esclarecer que a rapidez diz respeito ao prazo de execução, e não ao rigor, o protocolo aplicado é o mesmo, com idênticas etapas de validação de modelos e de síntese multimétodo, e suas análises são posteriormente submetidas a publicação em periódicos indexados, trajetória seguida, precisamente, pelo estudo relativo ao Rio Grande do Sul.

O estudo ***Climate change and El Niño behind extreme precipitation leading to major floods in southern Brazil in 2024***,[224] **publicado em janeiro de 2026 no periódico *npj Natural Hazards*** do grupo de revistas da *Nature* analisa a influência das mudanças climáticas no desastre decorrentes das chuvas extremas que atingiram o Rio Grande do Sul a partir de uma **abordagem probabilística de atribuição de eventos**.

A pesquisa foi conduzida por equipe internacional liderada por Ben Clarke e da já citada Dra. Friederike Otto, além de pesquisadores e professores brasileiros, como Regina Rodrigues, da Universidade Federal de Santa Catarina e Lincoln Muniz Alves, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A pesquisa foi publicada, após passar por revisão por pares[225].

Cumpre esclarecer que os dois resultados expressam o mesmo sinal climático em métricas distintas e complementares: a razão de probabilidade mede a alteração na frequência de ocorrência de eventos de determinada magnitude, ao passo que o percentual de

---

and Grantham Institute – Climate Change and the Environment, Imperial College London. Disponível em: https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/constructing-the-causal-chain-attribution-science-in-polluter-pays-climate-litigation/. P. 16 e World Weather Attribution. Methodology. Disponível em: https://www.worldweatherattribution.org/methods/.

[223] Seus estudos passam por etapas que são comuns a todos os tipos de estudos de atribuição, não apenas aqueles realizados pelo WWA e já foi aplicado em mais de 100 estudos rápidos, sendo cerca de 26 deles adicionalmente publicados em periódicos revisados por pares. Conforme descrição da metodologia das análises do World Weather Attribution, disponível em: https://www.worldweatherattribution.org/methods/. Acesso: 11 jun. 2026.

[224] Clarke, B., Barnes, C., Rodrigues, R. et al. Climate change and El Niño behind extreme precipitation leading to major floods in southern Brazil in 2024. npj Nat. Hazards 3, 4 (2026). DOI: https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8.

[225] Conforme descrição do conteúdo da vista disponível em: https://www.nature.com/npjnathazards/content-types. Acesso: 11 jun. 2026. Ver também a lista de estudos revisados por pares publicados do World Weather Attribution: https://www.worldweatherattribution.org/event-papers/. Acesso: 11 jun. 2026.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

intensificação mede o acréscimo de magnitude de eventos de determinada frequência. Para fins da quantificação postulada no item 4.2.7, adota-se deliberadamente a segunda métrica, o acréscimo de 12% na intensidade, por produzir resultado substancialmente inferior ao que decorreria da adoção da razão de probabilidade, cuja fração de risco atribuível seria da ordem de 50%.

O estudo atesta que **com um aquecimento global de 1,2 °C, tal evento tornou-se aproximadamente 2 vezes mais provável, ou equivalentemente 12% mais intenso**.[226] **O estudo conclui que a influência das mudanças climáticas na ocorrência do evento foi, inclusive, maior do que a influência do próprio El Niño.**[227]

Embora o padrão atmosférico observado seja compatível com os efeitos usualmente associados ao El Niño, os autores ressaltam que episódios historicamente mais intensos desse fenômeno não produziram precipitações de magnitude semelhante, constatação que se harmoniza com os registros hidrológicos da região, nos quais os anos de 1983 e 1984, marcados por El Niño excepcional, não alcançaram os níveis verificados em 2023 e 2024.

Conforme já destacado, o estudo confirma as previsões científicas de que o clima no Brasil mudou nas últimas décadas, impactando a ocorrência de eventos climáticos extremos, especialmente eventos de precipitação severa extrema e prolongada:

> Estudos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) corroboram com esses resultados, destacando que o clima já mudou no Brasil nas últimas décadas, impactando a ocorrência de extremos climáticos, como a precipitação máxima em 5 dias (RX5day). Observações das últimas seis décadas, coletadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), mostram uma mudança notável nos padrões climáticos. Os resultados indicam um aumento entre 10 e 30% na região sul do Brasil. Isso é consistente com os resultados do IPCC AR6, que mostram que aumentos na frequência e intensidade de eventos de precipitação intensa nesta região já foram observados no passado. Com aumentos adicionais nos níveis de aquecimento (projeções de modelo para um determinado nível de aquecimento em relação ao clima pré-industrial), espera-se que esses eventos se tornem mais frequentes e intensos. Essas condições mais úmidas

[226] Clarke, B., Barnes, C., Rodrigues, R. et al. Climate change and El Niño behind extreme precipitation leading to major floods in southern Brazil in 2024. npj Nat. Hazards 3, 4 (2026). DOI: https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8. P. 1.

[227] WORLD WEATHER ATTRIBUTION. When Risks Become Reality: Extreme Weather In 2024. Disponível em: https://www.worldweatherattribution.org/when-risks-become-reality-extreme-weather-in-2024/. P. 12. e Clarke, B., Barnes, C., Rodrigues, R. et al. Climate change and El Niño behind extreme precipitation leading to major floods in southern Brazil in 2024. npj Nat. Hazards 3, 4 (2026). DOI: https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8. P. 1.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

> provavelmente levarão a períodos mais longos de enchentes e vazões fluviais intensificadas.[228]
>
> Com base nos modelos climáticos CMIP6, Medeiros et al.21 constataram que o Brasil está projetado para experimentar uma tendência crescente para precipitação extrema severa e prolongada, especialmente no centro norte e nas partes sul (Almazroui et al.22; IPCC19). Outros estudos baseados em modelos climáticos CMIP5 chegaram a conclusões semelhantes: espera-se que o sul do Brasil tenha um clima médio mais úmido, juntamente com aumentos generalizados na intensidade dos dias chuvosos para o período de 2050–2100 em comparação com o sul do Brasil atual, além de maior variabilidade da precipitação (ver Fig. 3 em Alves et al.23; Cai et al.14).[229]

Ao analisar a influência das mudanças climáticas na ocorrência da chuva intensa que atingiu o Rio Grande do Sul, os cientistas constataram que 17 dos 22 modelos climáticos analisados, ou seja, 77% deles, mostraram aumentos no evento (chamado pela ciência de "rx4day") decorrentes de um aumento de 1,2 °C na temperatura média global da superfície do planeta (GMST).[230] **Destaca-se que o nível de concordância entre os modelos supera o limiar de "provável" (ou *"likely*", indicando o intervalo de 66-100% de probabilidade do resultado), comumente utilizado pelo IPCC.**

Importante destacar que as faixas de incerteza verificadas em algumas estimativas quantitativas não afastam a conclusão do estudo. Ao contrário, os cientistas identificam diferentes linhas de evidência convergentes no sentido de que o aquecimento global **amplificou o evento de precipitação extrema ocorrido em 2024**, dentre os quais destaca-se:

---

[228] Clarke, B., Barnes, C., Rodrigues, R. et al. Climate change and El Niño behind extreme precipitation leading to major floods in southern Brazil in 2024. npj Nat. Hazards 3, 4 (2026). DOI: https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8. Tradução juramentada integral do estudo de Clarke et al., *Climate change and El Niño behind extreme precipitation leading to major floods in southern Brazil in 2024*, p. 4.

[229] Ibidem, p. 4.

[230] De acordo com EBSCO, "A temperatura global da superfície refere-se à média estimada da temperatura do ar na superfície da Terra, obtida principalmente a partir de medições realizadas por termômetros em estações meteorológicas terrestres. Visto que cerca de 70% da superfície terrestre é composta por água, dados sobre a temperatura da superfície do mar (TSM) também são incorporados para aumentar a precisão dessas estimativas globais. [...] Esses registros de temperatura são fundamentais para a compreensão das tendências climáticas, e três grandes agências são responsáveis pela compilação e análise desses dados. [...] Ao longo do último século, a temperatura global da superfície aumentou entre 0,3°C e 0,7°C, indicando uma tendência preocupante associada às mudanças climáticas." Tradução livre. Freitas, C. R. de; *Global surface temperature*. EBSO, 2024. Disponível em: https://www.ebsco.com/research-starters/earth-and-atmospheric-sciences/global-surface-temperature. Acesso: 19 jun. 2026.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

1. a consistência das tendências de aumento entre conjuntos de dados observacionais, modelos climáticos e diferentes modelos estatísticos;

2. a existência de fundamento físico robusto, decorrente da relação de Clausius-Clapeyron, para o aumento da precipitação extrema em uma atmosfera mais quente;

3. a tendência de crescimento desses extremos observada desde a década de 1960; e

4. a convergência com outros trabalhos científicos realizados por metodologias distintas.[231]

Registre-se que as incertezas estatísticas remanescentes dizem respeito ao grau de precisão com que essa influência pode ser quantitativamente estimada e não à existência da influência antropogênica, com relação à qual não paira dúvida. O conjunto das evidências observacionais, dos modelos climáticos e dos fundamentos físicos permite concluir, em termos qualitativos robustos, que **o aquecimento global antropogênico contribuiu para aumentar a probabilidade e, sobretudo, a intensidade da precipitação extrema que atingiu o Rio Grande do Sul em 2024**[232].

A análise segue o Protocolo de Atribuição do *World Weather Attribution* (WWA), compreendendo quatro etapas sucessivas: (i) cálculo das tendências a partir das observações; (ii) validação dos modelos; (iii) atribuição multimétodo e multimodelo; e (iv) síntese final dos resultados de atribuição. A partir desse procedimento, são estimados o período de retorno do evento, a Razão de Probabilidade e a variação de sua intensidade, mediante comparação entre as condições climáticas atuais e aquelas do período pré-industrial[233].

O estudo deriva de uma outra análise de atribuição rápida realizada pelo World Weather Attribution em junho de 2024, *Climate change, El Niño and infrastructure failures behind massive floods in southern Brazil*,[234] que encontrou, pouco após a ocorrência das

[231] Ibidem, p. 14.
[232] Ibidem, p. 14.
[233] Ibidem, p. 19-20.
[234] WORLD WEATHER ATTRIBUTION. Climate change, El Niño and infrastructure failures behind massive floods in southern Brazil. 03 de junho de 2024. Disponível em:

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

13213128

chuvas, o resultado de **um aumento na probabilidade para os eventos de mais de um fator de 2 e um aumento de intensidade de 6 a 9% devido à queima de combustíveis fósseis.**

A diferença entre os resultados das duas análises decorre do refinamento metodológico. A primeira foi produzida poucas semanas após o evento, com dados preliminares e sob restrição de tempo; a segunda incorporou séries observacionais consolidadas, conjunto ampliado de modelos climáticos e validação metodológica completa.

Em sentido convergente, a análise do ClimaMeter denominada *"May 2024 South Brazil floods locally exacerbated by both human-driven climate change and natural variability",*[235] também de 2024, corrobora a conclusão de que as mudanças climáticas influenciaram o evento:

> Com base no exposto, **concluímos que depressões semelhantes às que provocaram as inundações no Brasil apresentam um aumento local na precipitação (1 a 6 mm/dia, ou seja, até 15% a mais de precipitação) sobre o estado do Rio Grande do Sul no presente em comparação com o passado**, mas não mostram alterações significativas na precipitação em larga escala nesse estado. Embora o fenômeno El Niño-Oscilação Sul possa ter favorecido as chuvas intensas, ele não explica as mudanças associadas a esse evento ao se compararem os períodos passado e presente. **Interpretamos as inundações no Brasil como um evento cujas características locais podem ser atribuídas, em grande parte, às mudanças climáticas causadas pela atividade humana.**[236] (tradução livre e grifos postos)

A influência das mudanças climáticas antropogênicas no evento de 2024 no Rio Grande do Sul foi reconhecida inclusive por órgão técnico do Estado brasileiro. A ANA, em seu relatório "As enchentes no Rio Grande do Sul - lições, desafios e caminhos para um

https://www.worldweatherattribution.org/climate-change-made-the-floods-in-southern-brazil-twice-as-likely/. Acesso: 11 jun. 2026.

[235] FARANDA, Davide; MESSORI, Gabriele; CAMARGO, Suzana J.; VARGAS-HEINZ, Luiza; COPPOLA, Erika. May 2024 South Brazil floods locally exacerbated by both human-driven climate change and natural variability. ClimaMeter, 02 de maio de 2024. Disponível em: https://www.climameter.org/20240502-south-brazil-floods. Acesso: 19 jun. 2026.

[236] FARANDA, Davide; MESSORI, Gabriele; CAMARGO, Suzana J.; VARGAS-HEINZ, Luiza; COPPOLA, Erika. May 2024 South Brazil floods locally exacerbated by both human-driven climate change and natural variability. ClimaMeter, 02 de maio de 2024. Disponível em: https://www.climameter.org/20240502-south-brazil-floods. Acesso: 19 jun. 2026.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

futuro resiliente",[237] utilizou o estudo de atribuição rápida do WWA,[238] afirmando que pesquisadores do Brasil, Reino Unido, Suécia, Países Baixos e Estados Unidos concluíram que a mudança climática induzida pelo homem tornou essas chuvas duas vezes mais prováveis e aumentou sua intensidade em 6 a 9%.[239] Para além desse reconhecimento, o relatório afirma que "[o]s eventos extremos de chuvas e cheias que atingiram o Rio Grande do Sul em 2024 evidenciaram a crescente influência das mudanças climáticas na hidrologia da região"[240].

Trata-se de agência reguladora federal adotando, em diagnóstico técnico oficial, os resultados de estudo de atribuição climática relativo ao evento objeto destes autos. O Governo Federal reconhece, assim, expressamente a existência e a idoneidade do campo científico da atribuição de eventos extremos, aplica-o ao evento específico de que tratam estes autos, registrando que o aquecimento global dobrou sua probabilidade de ocorrência e aumentou sua intensidade entre 6% e 9%. E o faz em instrumento de política pública nacional, de modo que qualquer impugnação à metodologia haverá de enfrentar o fato de que ela é adotada pelo próprio Estado brasileiro.

Em capítulo denominado "Relação dos eventos climáticos e meteorológicos extremos com a mudança do clima" da **Estratégia Nacional de Adaptação do Plano Clima**, **o Governo Federal reconhece a especial influência das mudanças climáticas para as chuvas de 2024 no Rio Grande do Sul a partir das conclusões do já citado estudo do**

---

[237] Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). As enchentes no Rio Grande do Sul: lições, desafios e caminhos para um futuro resiliente/Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. – Brasília: ANA, 2025. 57 p.: il. ISBN: 978-65-88101-73-5. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/estudo-aponta-que-enchentes-de-2024-foram-maior-desastre-natural-da-historia-do-rs-e-sugere-caminhos-para-futuro-com-eventos-extremos-mais-frequentes. Acesso: 17 jun. 2026.

[238] WORLD WEATHER ATTRIBUTION. Climate change, El Niño and infrastructure failures behind massive floods in southern Brazil. 03 de junho de 2024. Disponível em: https://www.worldweatherattribution.org/climate-change-made-the-floods-in-southern-brazil-twice-as-likely/. Acesso: 11 jun. 2026.

[239] Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). As enchentes no Rio Grande do Sul: lições, desafios e caminhos para um futuro resiliente/Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. – Brasília: ANA, 2025. 57 p.: il. ISBN: 978-65-88101-73-5. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/estudo-aponta-que-enchentes-de-2024-foram-maior-desastre-natural-da-historia-do-rs-e-sugere-caminhos-para-futuro-com-eventos-extremos-mais-frequentes. Acesso: 17 jun. 2026. P. 16.

[240] Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). As enchentes no Rio Ibid. P. 16.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

WWA e ressalta que o campo científico da ciência da atribuição permite se chegar a essas conclusões:

> Imediatamente após um evento climático extremo, é normal as pessoas questionarem até que ponto a mudança do clima, causada pelo homem, contribuiu para a probabilidade ou gravidade do evento. O emergente campo científico da **atribuição de eventos extremos** tem permitido responder a essa questão (Otto et al., 2022), e já existem estudos que demonstram essa relação no Brasil. Na **tragédia ocorrida no Rio Grande do Sul**, em maio de 2024, que resultou em mais de 169 mortes e 1,9 milhão de pessoas afetadas, constatou-se que, embora o fenômeno climático El Niño tenha contribuído para intensificar as precipitações, **o aquecimento global dobrou a probabilidade de ocorrência do evento** e aumentou a sua intensidade entre 6 e 9% (Clarke et al., 2024b).[241] (sublinhados postos)

O estudo de atribuição de evento extremo realizado por Clarke e outros, fornece o terceiro elo da cadeia causal climática relevante à presente demanda. A atribuição do aquecimento demonstra que as atividades humanas, principalmente por meio das emissões de gases de efeito estufa, inequivocamente causaram o aquecimento global observado; a atribuição de fontes quantifica a participação individual da demandada nesse conjunto, correspondente a 2,02% das emissões cumulativas de CO2 provenientes de combustíveis fósseis e cimento.; e a atribuição de eventos demonstra que o evento climático extremo que atingiu o Rio Grande do Sul em 2024 tornou-se cerca de duas vezes mais provável e aproximadamente 12% mais intenso em razão do aquecimento global antropogênico.s.

A distinção metodológica entre os efeitos do El Niño e os do aquecimento global afasta a explicação do desastre exclusivamente pela variabilidade climática natural. O estudo reconhece a contribuição do fenômeno natural e demonstra, autonomamente, que o aquecimento exerceu influência própria, mensurável e superior sobre a probabilidade e a intensidade das chuvas extremas. O fenômeno natural não exclui, não substitui e não neutraliza, portanto, a contribuição causal das mudanças climáticas.

Trata-se de produção científica fundada em metodologia reconhecida no campo da atribuição de eventos extremos, validada por revisão por pares e inserida em literatura internacional especializada. Registre-se que o estudo é anterior e alheio à presente demanda: foi concebido, executado e publicado por equipe internacional de pesquisa, por razões

[241] MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. Plano Clima Adaptação - Estratégia Nacional de Adaptação. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smc/plano-clima/plano-clima-adaptacao. P. 56. Acesso: 19 jun. 2026.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

estranhas a este litígio, com dados e códigos de acesso público. Sua independência em relação às partes constitui, precisamente, a credencial mais relevante de uma prova técnica.

Os autores do estudo explicitam as limitações dos modelos climáticos disponíveis, o que não compromete a conclusão, uma vez que a etapa de validação descarta os modelos que não reproduzem adequadamente o clima regional; as linhas convergentes de evidência observacional, física e histórica independem da modelagem; e a metodologia adotada tende a subestimar, e não a superestimar, a magnitude do efeito climático.

4.2.4.3.4 Consolidação do nexo de causalidade por meio da melhor ciência disponível

Parecer científico subscrito pelo Prof. Paulo Artaxo, renomado professor do Instituto de Física da Universidade de São Paulo e membro do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), que instrui a presente demanda, atesta que a demanda ora proposta está deduzida a partir da **melhor ciência disponível na atualidade**.

A ciência da atribuição, nos seus diferentes ramos, abordagens e métodos de análise demonstram e identificam o nexo de causalidade entre a conduta da empresa demandada e a ocorrência do evento climático que atingiu o estado gaúcho.

Restou amplamente demonstrado que todas as fontes utilizadas, com destaque para o relatório AR6 do IPCC e a plataforma *Carbon Majors* são internacionalmente reconhecidas, inclusive em litígios estrangeiros e internacionais, sendo, portanto, válidas para identificar o nexo de causalidade entre a atividade de uma empresa e a ocorrência de eventos climáticos extremos influenciados pelas mudanças climáticas antropogênicas.

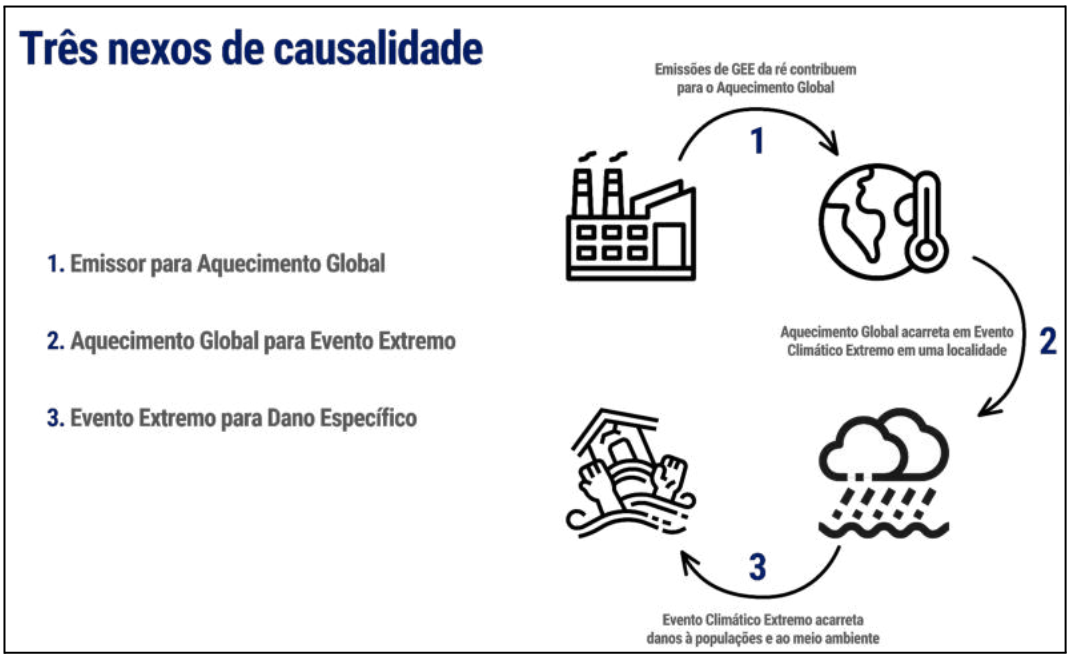
Ademais, o estudo ***Climate change and El Niño behind extreme precipitation leading to major floods in southern Brazil in 2024***, **publicado em janeiro de 2026 no periódico *npj Natural Hazards* da Nature** atende a todos parâmetros dispostos no Parecer Consultivo PC-32/2025 da Corte IDH para ser considerado como a melhor ciência disponível sobre a análise da influência das mudanças climáticas no evento climático do RS, pois (i) é atualizado, tendo sido publicado em janeiro de 2026; (ii) foi elaborado com base em metodologia avaliada por pares, utilizando o Protocolo do World Weather Attribution; (iii) sua divulgação na *npj Natural Hazards* ocorreu após a revisão por pares; (iv) comunica com

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

clareza as incertezas científicas tanto ao longo da descrição das análises e resultados quanto na descrição dos métodos utilizados; (v) é verificável e reproduzível, com acesso público aos dados, conforme as seções do estudo "Disponibilidade de dados" e "Disponibilidade de Código"; (vi) apresenta com precisão suas fontes de informação, fundamentadas na literatura científica relevante, empiricamente comprovada e atualizada, sem omitir, alterar ou deturpar dados e literatura pertinentes, conforme pode ser observado ao longo de todo o corpo do estudo; e (vii) deriva suas conclusões com exatidão a partir dos dados disponíveis, sem omitir, alterar ou deturpar resultados relevantes, conforme pode ser observado ao longo de todo o corpo do estudo.

Registre-se que os critérios enunciados pela Corte IDH são aqui invocados como parâmetro qualificado de aferição da idoneidade técnica da prova, e não como norma vinculante dirigida ao juízo nacional.

Encontra-se, assim, demonstrado o nexo de causalidade entre a atividade da ré e agravamento do Evento Climático Extremo que atingiu o Rio Grande do Sul em 2024, conforme representado na figura:



Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

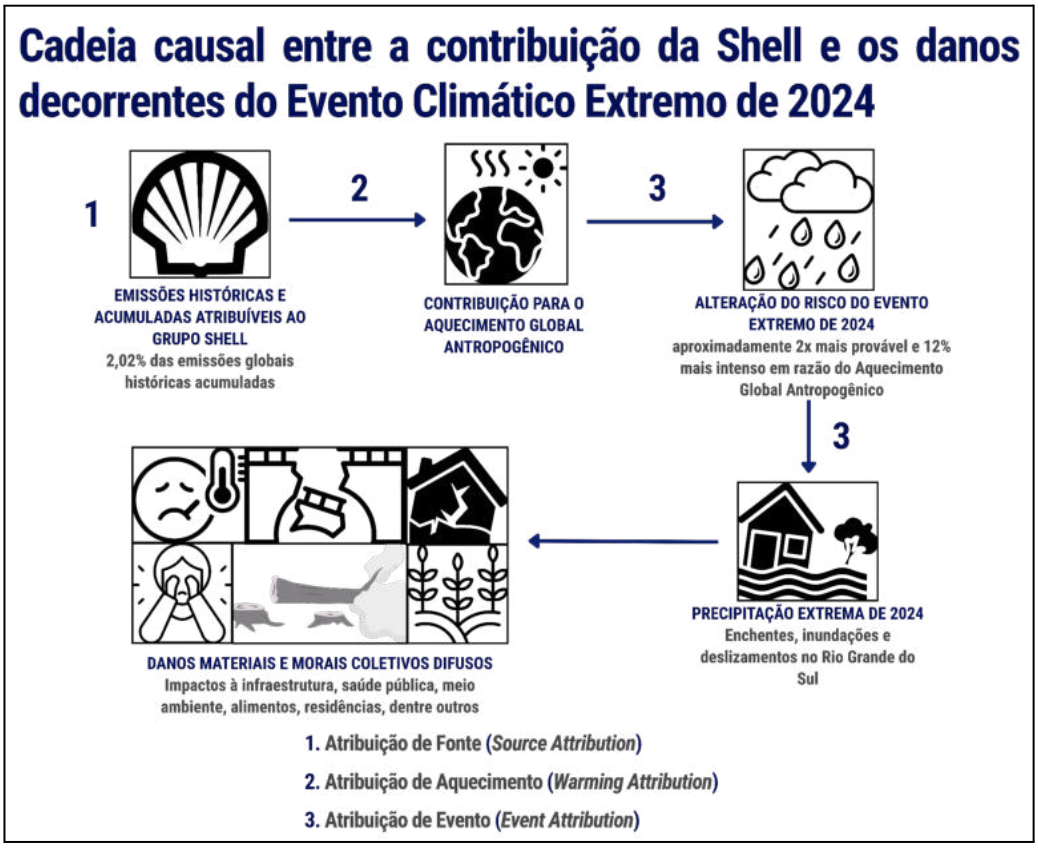
Da análise conjunta dos três níveis de atribuição resulta a reconstituição da cadeia causal necessária à responsabilização civil ambiental-climática.

Primeiro, demonstra-se que as atividades humanas, principalmente por meio das emissões de gases de efeito estufa, inequivocamente causaram o aquecimento global, que já produz efeitos concretos.

Segundo, demonstra-se que a demandada, integrante de grupo econômico identificado entre os maiores emissores históricos, possui contribuição identificável e quantificável para esse processo, correspondente a 2,02% das emissões cumulativas globais de CO2 provenientes de combustíveis fósseis.

Terceiro, demonstra-se que o evento climático extremo ocorrido no Rio Grande do Sul entre abril e maio de 2024 foi significativamente agravado pelas mudanças climáticas antropogênicas, tornando-se cerca de duas vezes mais provável e aproximadamente 12% mais intenso.

Em síntese:



Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

4.2.6. Irrelevância da licitude da atividade

Não raro o poluidor, diante de uma demanda buscando reparação civil por dano ambiental, apresenta como argumento de defesa a licitude da sua conduta, tendo em vista que (i) não existiriam parâmetros relacionados às substâncias por ele emitidas; (ii) estaria operando dentro dos padrões de emissão definidos pela autoridade administrativa, ou (iii) ele teria licença ambiental para exercer aquela atividade.

Conforme já abordado ao longo da presente demanda, o limite de tolerabilidade do meio ambiente não está necessária ou exclusivamente vinculado aos padrões de emissão de matéria e energia. É possível que ocorra dano ambiental mesmo em situações em que são respeitados os respectivos parâmetros legais.[242] Com efeito, o dano e sua relação com o agente que o causa constituem o binômio do qual resulta a responsabilidade. Em outras palavras, a atividade pode ser lícita, mas o dano que dela decorre nunca o é.

De igual modo, a licença ambiental, ainda que regularmente cumpridas suas condicionantes, não exime o empreendedor licenciado de responder pelo dano ambiental gerado por sua atividade, mas tão somente impossibilita que ele sofra penalidades administrativas, uma vez que está agindo de acordo com os ditames legais.[243]

Tal compreensão decorre do próprio texto constitucional. O art. 225, § 3º, da Constituição estabelece que as condutas e atividades lesivas ao meio ambiente sujeitam os infratores a sanções penais e administrativas, independentemente da obrigação de reparar os danos causados, separando expressamente o plano administrativo do plano reparatório. A regularidade administrativa, ainda que plena, não interfere, portanto, no dever de reparar.

Daí que se extrai que **é o resultado danoso produzido pela conduta que vai gerar a obrigação de reparar o prejuízo ao meio ambiente, independentemente da eventual licitude da atividade, da existência de licenciamento ambiental regular em curso, ou mesmo da observância de padrões de emissão de poluentes (ou da inexistência desses padrões)**.

---

[242] MIRRA, Álvaro Luiz Valery. *Ação civil pública e reparação do dano ao meio ambiente*. 2ª ed. São Paulo: Juarez de Oliveira, 2004, p. 106.
[243] MILARÉ, Édis. *Direito do Ambiente*. 11a ed. rev., atual., e ampl. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2018, p. 452.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

Registre-se que sequer existem, no ordenamento brasileiro, padrões de emissão de gases de efeito estufa aplicáveis à atividade de exploração e produção desenvolvida pela demandada. A ausência de parametrização administrativa, contudo, não confere imunidade. Fosse assim, o poluidor cuja atividade ainda não foi objeto de regulação específica estaria em posição mais favorável do que aquele submetido a limites, resultado que contraria frontalmente os princípios da prevenção e do poluidor-pagador, além de esvaziar o regime de responsabilidade objetiva. **O limite de tolerabilidade afere-se pela capacidade de assimilação do meio, e não pela existência de norma administrativa que o discipline**.

A jurisprudência pátria é pacífica ao considerar que a mera concessão de licença ambiental para a atividade não pode implicar permissão irrestrita para o exercício do empreendimento, devendo-se considerar os riscos (e danos) por ele gerados:

> DIREITO CONSTITUCIONAL. AÇÃO CIVIL PÚBLICA. QUEIMA CONTROLADA DE PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR. LICENÇA AMBIENTAL CONCEDIDA PELO ÓRGÃO ESTADUAL. IBAMA COMPETÊNCIA SUPLETIVA. IMPROCEDÊNCIA.
> [...]
> **9. A licença ambiental concedida não respalda o exercício da atividade em termos irrestritos, pois a respectiva execução sujeita-se a situações que não coloquem em risco concreto bens jurídicos tutelados. Pode a licença ser suspensa ou cancelada, nos casos especificados, cabendo o respectivo controle ao órgão ambiental, sem prejuízo do acompanhamento pelo Ministério Público e outros órgãos. Não se trata, portanto, de permitir ou de proibir de forma genérica e absoluta, mas de compatibilizar, não apenas na concessão da licença, como na execução da respectiva atividade, os valores constitucionais**.
> 10. Apelação improvida[244] (grifos postos).

De igual forma, o STJ já consolidou o entendimento de que o dano ambiental se caracteriza pela degradação ambiental, mesmo que esta ocorra em decorrência de uma atividade lícita, razão pela qual o poluidor deve arcar com todas as consequências de sua prática danosa:

> DIREITO AMBIENTAL. RECURSO ESPECIAL. RESPONSABILIDADE CIVIL AMBIENTAL. CONSTRUÇÃO E IMPLANTAÇÃO DE USINA HIDRELÉTRICA. COMPLEXO HIDRELÉTRICO DO RIO MADEIRA, COMPOSTO PELAS USINAS DE SANTO ANTÔNIO E JIRAU. REDUÇÃO DO ESTOQUE PESQUEIRO. LITÍGIO ESTRUTURAL. RESPONSABILIDADE OBJETIVA. TEORIA DO RISCO INTEGRAL. DANO AMBIENTAL.

[244] TRF3. AC 00078601120104036102, 3ª Turma, rela. Juíza Convocada Eliana Macedo, julgado em 03.12.2015, publicado no DJF3 de 17.12.2015.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

> ICTIOFAUNA. MICROBEM. ADOÇÃO DE MEDIDAS TENDENTES A NEUTRALIZAR OS DANOS. IRRELEVÂNCIA. ATO LÍCITO. PESCADORES ARTESANAIS. NÃO COMPROVAÇÃO DA ATIVIDADE. TEMA 680 DO STJ. AUSÊNCIA DE COMPROVAÇÃO DOS LUCROS CESSANTES. LIQUIDAÇÃO DE SENTENÇA. IMPOSSIBILIDADE. RECURSOS ESPECIAIS PROVIDOS.
> [...]
> 3. Esta Corte, ao interpretar a responsabilidade por danos ambientais, fixou o entendimento, em julgamento de recursos especiais repetitivos (Temas 681 e 707), no sentido de que se trata de **responsabilidade objetiva, fundada na teoria do risco integral, decorrente do princípio poluidor-pagador, que imputa ao poluidor - aquele que internaliza os lucros - a responsabilização pelo impacto negativo causado ao meio ambiente, sendo inviável a invocação de excludentes de responsabilidade civil para afastar a obrigação de indenizar**.
> 4. **Ainda que provenha do exercício de atividades lícitas e socialmente desejáveis ou necessárias, o dano ambiental pode caracterizar-se pela degradação ambiental, figurando o poluidor, conquanto adote todas as medidas legais e administrativas tendentes a neutralizar os potenciais efeitos de sua atividade, como garantidor das eventuais consequências ambientais**.
> [...]
> 13. Recursos especiais providos.
> (REsp n. 2.102.646/RO, relator Ministro Antonio Carlos Ferreira, Quarta Turma, julgado em 5/5/2026, DJEN de 13/5/2026.)

Alguns elementos do precedente merecem destaque. Trata-se de julgado recente, o que afasta eventual alegação de que a orientação sobre a teoria do risco integral seria datada. O item 4 assenta que o dano ambiental pode caracterizar-se ainda quando proveniente de atividades lícitas e socialmente desejáveis, figurando o poluidor como garantidor das consequências ambientais mesmo tendo adotado todas as medidas legais e administrativas tendentes a neutralizá-las. E reafirma expressamente as teses firmadas nos Temas Repetitivos 681[245] e 707[246]. Registre-se, ademais, a similitude fática: o precedente versa sobre danos decorrentes de empreendimento hidrelétrico, em que se rejeitou a tese de que o evento hidrológico extraordinário seria causa eficiente exclusiva do dano.

[245] Tese: A responsabilidade por dano ambiental é objetiva, informada pela teoria do risco integral, sendo o nexo de causalidade o fator aglutinante que permite que o risco se integre na unidade do ato, sendo descabida a invocação, pela empresa responsável pelo dano ambiental, de excludentes de responsabilidade civil para afastar a sua obrigação de indenizar.

[246] Tese: a) a responsabilidade por dano ambiental é objetiva, informada pela teoria do risco integral, sendo o nexo de causalidade o fator aglutinante que permite que o risco se integre na unidade do ato, sendo descabida a invocação, pela empresa responsável pelo dano ambiental, de excludentes de responsabilidade civil para afastar sua obrigação de indenizar; b) em decorrência do acidente, a empresa deve recompor os danos materiais e morais causados; c) na fixação da indenização por danos morais, recomendável que o arbitramento seja feito caso a caso e com moderação, proporcionalmente ao grau de culpa, ao nível socioeconômico do autor, e, ainda, ao porte da empresa, orientando-se o juiz pelos critérios sugeridos pela doutrina e jurisprudência, com razoabilidade, valendo-se de sua experiência e bom senso, atento à realidade da vida e às peculiaridades de cada caso, de modo a que, de um lado, não haja enriquecimento sem causa de quem recebe a indenização e, de outro, haja efetiva compensação pelos danos morais experimentados por aquele que fora lesado.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

Ainda que integralmente lícita e regularmente licenciada a atividade da demandada, o que se admite para efeito de argumentação, subsiste o dever de reparar os danos dela decorrentes. As emissões de gases de efeito estufa geradas por sua atividade, direta e indiretamente, guardam relação causal com o agravamento dos eventos climáticos extremos que atingiram o Rio Grande do Sul, e é o resultado danoso, e não a qualificação administrativa da conduta, que faz nascer a obrigação de indenizar.

4.2.6.1 Inaplicabilidade das excludentes de responsabilidade: previsibilidade do evento, fortuito interno e concausalidade

É previsível que a ré, em sua defesa, alegue que as inundações de 2024 no Rio Grande do Sul decorreram de fenômeno natural extraordinário. Nessa linha, invocará força maior, caso fortuito, fato de terceiro ou a concorrência de múltiplas causas para romper o nexo entre sua atividade e os danos descritos nesta inicial. A alegação não se sustenta.

A responsabilidade civil por dano ambiental é objetiva e informada pela teoria do risco integral, que se distingue da teoria do risco criado ou do risco proveito precisamente por não admitir as causas excludentes do nexo causal. Na tutela do meio ambiente, o ordenamento imputa ao empreendedor a integralidade dos riscos inerentes à atividade que explora. Assim, quem se beneficia economicamente da atividade potencialmente degradadora suporta seus desdobramentos lesivos, em concretização do princípio do poluidor-pagador.

Força maior, caso fortuito e fato de terceiro não são oponíveis à pretensão reparatória ambiental. Esse fundamento é suficiente para rejeitar a defesa. Ainda assim, as considerações seguintes são necessárias, porque evidenciam que a alegação da ré é também faticamente insubsistente.

O art. 393, parágrafo único, do Código Civil caracteriza o caso fortuito e a força maior como o fato necessário cujos efeitos não era possível evitar ou impedir. Doutrina e jurisprudência extraem daí os requisitos da inevitabilidade e da imprevisibilidade. Só é inevitável, em sentido jurídico, aquilo que não podia ser antecipado nem, portanto, prevenido

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

ou mitigado. O evento que se anuncia com antecedência de décadas não é fato necessário, mas risco conhecido que se escolheu não enfrentar.

A intensificação dos eventos extremos de precipitação no Rio Grande do Sul está longe de ser imprevisível. O quadro fático exposto no item 3 desta inicial mostra que ela foi objeto de projeções técnicas oficiais, reiteradas e públicas.

Ainda em 2015, a Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República projetou a alteração do regime de chuvas na região Sul, com aumento da frequência e da intensidade de eventos de precipitação extrema.

Desde 2021, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) registra a tendência observada e projetada de intensificação desses eventos no Sudeste da América do Sul.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) anteciparam o agravamento do padrão de chuvas intensas no Estado.

O argumento decisivo, contudo, está em outro ponto. Como demonstrado no item 4.2.8, **a própria ré dispunha, ao menos desde a década de 1980, de conhecimento interno consistente sobre os efeitos climáticos das emissões associadas à sua atividade**. **Em 1991, chegou a produzir e divulgar documentário que advertia expressamente para o risco de inundações e de eventos meteorológicos extremos como consequência do aquecimento global.**

A conclusão é inescapável: o evento foi previsto pela própria ré. Quem antecipou, com mais de três décadas de antecedência, a ocorrência de inundações e eventos extremos como efeito da atividade que desempenha não pode alegar que foi surpreendida por eles. Admitir o contrário permitiria à ré beneficiar-se da própria omissão (*nemo auditur propriam turpitudinem allegans*), em manifesta violação à boa-fé objetiva. Seria também incompatível com os princípios da prevenção, da precaução e do poluidor-pagador, que orientam todo o regime jurídico ambiental.

Falta, igualmente, a inevitabilidade. Os efeitos eram evitáveis ou, no mínimo, mitigáveis por condutas ao alcance da ré. Ela poderia ter reduzido suas emissões, ajustado sua

13213426928

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

estratégia empresarial ao conhecimento científico que detinha. O que se apresenta como fatalidade natural é, em verdade, a materialização do risco que a ré conhecia, calculou e assumiu.

E, ainda que se superasse a vedação decorrente do risco integral, a excludente de caso fortuito continuaria inaplicável. Os eventos climáticos extremos intensificados pelas emissões de gases de efeito estufa **não são estranhos à atividade emissora**. São desdobramento causal previsível, cientificamente descrito e, no caso, reconhecido pela própria ré. A precipitação extrema de 2024 não é um fato exterior que se interpõe entre a conduta e o dano. Ela é o próprio mecanismo pelo qual a contribuição da ré para a alteração do sistema climático se converte em lesão concreta. Trata-se, portanto, de fortuito interno, incapaz de afastar o dever de reparar.

Por fim, a existência de concausas não elimina a contribuição causal de cada agente. No direito ambiental, o nexo causal é aferido de modo amplo, e o art. 3º, IV, da Lei nº 6.938/1981 considera poluidor todo aquele responsável, direta ou indiretamente, pela atividade causadora de degradação ambiental. A pluralidade de responsáveis gera, quando muito, solidariedade (art. 942 do Código Civil), jamais a exoneração de qualquer deles.

Ademais, no caso dos autos, a reparação que está sendo pleiteada é proporcional, por liberalidade dos autores, e a despeito da solidariedade estabelecida. Por isso, eventual alegação de concausalidade não seria apenas desarrazoada, mas inteiramente incompatível com o pedido que foi formulado.

Em outras palavras: o reconhecimento de que outros fatores concorreram para o resultado é premissa da própria da quantificação proposta pelos autores. A defesa ao apontar concausas não irá refutar a pretensão, mas apenas confirmar o método adotado.

4.2.7. Solidariedade e reparação proporcional dos danos materiais

É entendimento consolidado na doutrina e na jurisprudência que, havendo mais de uma fonte geradora de dano ambiental e, sendo este dano difuso e indivisível, aplica-se o princípio da solidariedade entre os copoluidores. Isso se dá por força de interpretação

13213126928

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

conjunta do artigo 942 do Código Civil[247] com o artigo 14, § 1º da Lei nº 6.938/1981 que, à luz do amplo conceito de poluidor (art. 3º, IV, Lei nº 6.938/1981), não distingue o poluidor direto do poluidor indireto, sendo ambos considerados sujeitos passivos da obrigação de reparar.

Com isso, é possível que o autor demande a integralidade do dano de qualquer dos corresponsáveis, de alguns ou de todos em conjunto.[248]

A solidariedade é um instrumento legal que visa proteger a vítima, no caso dos autos, a coletividade afetada pelo desastre climático em questão. Ela se justifica em casos nos quais múltiplos atores e atividades contribuem para a deflagração de um dano ambiental, desobrigando a vítima de ter que demonstrar a participação exata de cada um dos poluidores, podendo pleitear a totalidade dos custos da reparação de qualquer um dos corresponsáveis.[249]

Sobre este ponto, o Min. Herman Benjamin[250] destaca que a responsabilidade solidária pelo dano ambiental decorre não apenas da multiplicidade de sujeitos responsáveis pela atividade degradadora, mas também da própria indivisibilidade do dano, presente em razão de o meio ambiente ser uma unidade infragmentável.

A indivisibilidade do dano não obsta a pretensão proporcional aqui deduzida. Ela diz respeito ao bem lesado e à obrigação perante a coletividade, e é precisamente o que fundamenta a solidariedade. A proporcionalidade, por sua vez, não fraciona o dano: ela apenas permite que se pleiteie de um dos corresponsáveis a reparação parcial do dano, subsistindo íntegra a responsabilidade solidária de todos os poluidores pela integralidade da lesão.

O princípio da reparação integral, consagrado no art. 4º, VII, da Lei nº 6.938/1981, impõe que a tutela ambiental alcance todas as dimensões da degradação, inclusive os danos

[247] Artigo 942 do Código Civil: "Os bens do responsável pela ofensa ou violação do direito de outrem ficam sujeitos à reparação do dano causado; e, se a ofensa tiver mais de um autor, todos responderão solidariamente pela reparação".
[248] Nesse sentido, o entendimento do STJ: A ação civil pública ou coletiva por danos ambientais, a responsabilização civil pela degradação ambiental é solidária, logo a pretensão pode ser ajuizada contra qualquer um dos corresponsáveis, a regra geral é o litisconsórcio facultativo.STJ. Jurisprudência em teses. Direito ambiental. n. 30. Brasília. 18 de março de 2015, tese 7.
[249] CARVALHO, Délton Winter de. Limites à responsabilidade solidária e à caracterização do poluidor indireto. *Veredas do Direito*. Vol. 17. N. 39, Set./Dez. 2020, p. 71.
[250] BENJAMIN, Antonio Herman V. Responsabilidade civil pelo dano ambiental. *Revista de Direito Ambiental*. N. 9: São Paulo: Revista dos Tribunais, jan./mar. 1998, p.38.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

materiais, morais coletivos, interinos e residuais[251]. E a jurisprudência do STJ reconhece, nesse sentido, que a recomposição *in natura*, ainda que possível, nem sempre exaure os deveres decorrentes dos princípios do poluidor-pagador e da reparação *in integrum*, admitindo-se a cumulação das medidas necessárias à integral tutela do bem ambiental[252].

No caso do dano climático indireto, contudo, o retorno ao *status quo ante* é materialmente inviável, o que justifica a conversão em tutela ressarcitória pecuniária, conforme já referido.

Nesse contexto, deve-se aplicar a estimativa, com base na melhor ciência disponível, do grau de participação de cada uma das fontes poluidoras na produção do resultado lesivo para que cada um dos agentes seja obrigado a reparar o dano ao menos parcialmente, com base na sua parcela de contribuição para a ocorrência desse resultado. A proporcionalidade não reduz a extensão dos danos juridicamente reparáveis, servindo apenas para delimitar qual seria a parcela mínima de responsabilidade atribuível à empresa demandada, conforme sua contribuição histórica e continuada para as emissões de GEE.

Qualifica-se a parcela postulada como **mínima**, uma vez que **a metodologia probabilística adotada pelo estudo de atribuição é a mais conservadora disponível e tende a subestimar a magnitude do efeito climático**. Assim, optou-se pela métrica de intensificação, e não pela razão de probabilidade, que produziria fração atribuível substancialmente superior.

Por outro lado, a base de cálculo ora apresentada - em sendo necessário o estabelecimento de um parâmetro mínimo - utiliza-se de valores públicos oficiais e auditáveis, sem prejuízo de que, após apuração própria, em sede de liquidação de sentença, sejam estimados danos ambientais ainda não quantificados, chegando-se à montante superior ao ora estabelecido.

Assim, sendo cientificamente estabelecido que danos ambientais-climáticos se relacionam a emissões de GEE e identificado percentualmente quanto desses gases a ré

[251] MIRRA, Álvaro Luiz Valery. Responsabilidade civil ambiental e a jurisprudência do STJ. Cadernos Jurídicos da Escola Paulista da Magistratura, São Paulo, ano 20, n. 48, mar./abr. 2019, p. 59-60.
[252] STJ, REsp nº 1.145.083/MG, Segunda Turma, Rel. Min. Herman Benjamin, julgado em 27/09/2011, DJe de 04/09/2012

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

emitiu, direta ou indiretamente, identificado também está o quinhão mínimo que lhe cabe, adotando-se uma relação de proporcionalidade.[253]

Registre-se que a opção pela pretensão proporcional[254] representa **renúncia à faculdade legal**: sob o regime da solidariedade, poderiam os autores exigir da demandada a integralidade do dano, cabendo-lhe buscar regresso contra os demais corresponsáveis.

Cumpre explicitar, todavia, a natureza da operação:

O estudo de atribuição não indica fração do dano, mas acréscimo de intensidade da precipitação. Sua utilização como fator de imputação proporcional constitui critério jurídico, e não conclusão científica: não havendo, no estado atual do conhecimento, método que permita converter com exatidão acréscimo pluviométrico em fração de prejuízo, adota-se o percentual apurado como parâmetro de razoabilidade. Registre-se que os danos por inundação tendem a crescer de modo não linear em relação ao volume precipitado, sobretudo após superados os limiares de contenção, de sorte que o critério aqui empregado é conservador também nesse aspecto.

Assim, para fins de quantificação do dano material, adota-se como primeiro fator de atribuição o percentual de 12%, correspondente à intensificação do evento extremo associado às mudanças climáticas, conforme discriminado no item 4.2.5.3.3.

Àquele parâmetro, multiplica-se a participação de 2,02% atribuída ao grupo econômico de que integra a demandada[255] nas emissões cumulativas globais de CO2

[253] STEIGLEDER, Annelise Monteiro. Os estudos de atribuição e a responsabilidade civil ambiental por danos climáticos. *Migalhas*. 13 Abr. 2021; e STEIGLEDER, Annelise Monteiro e MARQUES, Claudia Lima. A aplicação da *pollution share liability* no direito brasileiro: reflexões a partir das contribuições de Antonio Herman de Vasconcellos e Benjamin para a responsabilidade civil ambiental. *Revista de direito ambiental*, v. 25, n. 100, out./dez. 2020, p. 27-55.

[254] O caso Lliuya v. RWE firmou, em tese, a possibilidade de imputação proporcional de responsabilidade climática. Após dez anos de tramitação, o Tribunal Regional Superior de Hamm (Oberlandesgericht Hamm, 5ª Câmara Civil, caso I-5 U 15/17) julgou a demanda em 2025, rejeitando-a por entender que o risco de inundação da propriedade do autor, estimado em cerca de 1% em trinta anos, não alcançava o grau de iminência exigido pelo Código Civil alemão, razão pela qual não chegou a examinar os estudos de atribuição climática. O Tribunal assentou, contudo, três proposições de princípio: que grandes emissores podem responder civilmente por danos climáticos ocorridos em outros territórios; que a participação relativamente pequena de determinado emissor no total global não afasta sua responsabilidade jurídica; e que essa responsabilidade, quando configurada, é proporcional à contribuição do agente.

[255] A imputação integral desse percentual à demandada decorre da solidariedade que rege a responsabilidade civil ambiental, pois ao integrar a cadeia econômica geradora das emissões, operando sob as diretrizes e a estratégia corporativa do conglomerado e auferindo os benefícios econômicos da atividade, responde perante a coletividade pela contribuição do grupo.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

provenientes de combustíveis fósseis e cimento, conforme a base *Carbon Majors*, com dados até 2024.

A conjugação desses dois fatores obedece à lógica sequencial do dano verificado: 12% do dano são atribuíveis ao agravamento do evento pela mudança do clima e, dessa fração, 2,02% correspondem à contribuição da demandada para o fenômeno, o que equivale a 0,24% do dano total.

Dano material atribuível à ré = Base pública de danos e custos do evento climático extremo × 12% × participação da ré nas emissões globais cumulativas

Considerando a participação aproximada de 2,02% da ré nas emissões globais cumulativas, tem-se:

Dano material atribuível à ré = Base pública de danos e custos da tragédia × 0,2424%[256]

A base de cálculo corresponde aos valores públicos destinados direta ou indiretamente ao Estado do Rio Grande do Sul, aos seus municípios e à população atingida, em razão da tragédia climática de 2024, assim organizados:

a) dispêndios definitivos, assim compreendidos os repasses diretos às famílias atingidas, notadamente o auxílio reconstrução e compra assistida de imóveis, os recursos empenhados para resposta emergencial e assistência humanitária e os valores destinados a obras de construção de moradias e reconstrução de infraestrutura;

b) renúncias de receita, compreendendo isenções, reduções de alíquota, créditos presumidos, manutenção de créditos fiscais e devoluções tributárias concedidas em razão direta do evento, valores que, embora não configurem despesa contábil, representam receita que deixou de ingressar nos cofres públicos em decorrência do desastre;

[256] 12% multiplicado por 2,02%.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

a) diferimentos de obrigações, compreendendo a suspensão das dívidas do Estado com a União, cuja repercussão orçamentária é igualmente real, ainda que de natureza distinta das anteriores e que constituíram o Fundo do Plano Rio Grande, destinado a centralizar e financiar ações de enfrentamento aos impactos climáticos.

Esses valores, segundo informações oficiais divulgadas pela Secretaria de Comunicação Social da Presidência da República, apontam a destinação de R$ 111,6 bilhões[257].

O critério ora proposto não constitui arbitramento aleatório, mas metodologia juridicamente adequada para a apuração de dano climático em contexto de causalidade cumulativa, difusa e concorrente, sobretudo em virtude da dificuldade de estimação precisa de todos os danos causados, muitos dos quais irreversíveis. Trata-se de critério conservador, pois limita o pedido material à sua reparação apenas parcial: primeiro, à fração do evento atribuída às mudanças climáticas; e, segundo, à fração das emissões globais cumulativas atribuídas à ré. Por fim, não integra a totalidade de danos, mas apenas aqueles que encontram abrigo em dados oficiais.

A adoção de responsabilidade proporcional não afasta a natureza objetiva, integral e solidária da responsabilidade civil ambiental. Ao contrário, representa técnica de quantificação do dano adequada à complexidade da causalidade climática, sem prejuízo de eventual reconhecimento da solidariedade entre grandes emissores, integrantes da cadeia econômica de valor e demais responsáveis diretos ou indiretos pelo dano ambiental-climático.

Em termos meramente exemplificativos, considerando as informações oficiais prestadas pelo Governo Federal, a base de cálculo corresponde ao montante total destinado ao Estado do Rio Grande do Sul, que alcança o valor de R$ 111,6 bilhões.

Aplicando-se, portanto, o fator de atribuição de 0,2424%, correspondente à conjugação entre a intensificação climática do evento e a participação proporcional da ré nas

[257] Disponível em: https://www.gov.br/secom/acl_users/credentials_cookie_auth/require_login?came_from=https%3A//www.gov.br/secom/pt-br/acompanhe-a-secom/noticias/2025/04/destinacao-de-r-111-6-bilhoes-e-grande-mobilizacao-reconstrucao-do-rs-contou-com-acoes-emergenciais-e-estruturantes-do-governo-federal

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

emissões globais cumulativas, o valor material mínimo atribuível à ré corresponderia a aproximadamente R$ 270.518.400,00 (duzentos e setenta milhões e trezentos e quinhentos e dezoito mil e quatrocentos reais), sem prejuízo de atualização, complementação e apuração definitiva em liquidação de sentença.

Ressalte-se que os valores ora indicados possuem natureza estimativa, referencial e demonstrativa, devendo o montante definitivo dos danos materiais ser apurado em sede de liquidação de sentença, a partir dos dados oficiais atualizados relativos às verbas direta e indiretamente destinadas ao Estado do Rio Grande do Sul, aos seus municípios e à população atingida em razão das enchentes de 2024.

Tal situação não afasta, contudo, a necessidade de que a sentença condenatória fixe, desde logo, o critério jurídico de quantificação da responsabilidade material da ré. Em outras palavras, a liquidação deverá apurar o *quantum debeatur*, mas o *an debeatur* e a metodologia de cálculo deverão ser definidos na fase de conhecimento, observando-se o patamar, a lógica e os cálculos ora apresentados.

4.2.8. Dano moral coletivo

O princípio da reparação integral do dano ambiental pressupõe o dever de indenizar os danos causados também sob a perspectiva imaterial da coletividade. Sobrevindo intranquilidade social e alterações relevantes na esfera extrapatrimonial de uma coletividade de pessoas em virtude da afetação do direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, não há dúvidas de que se torna indispensável a reparação também dos danos morais coletivos, na esteira do disposto no artigo 1º da Lei 7.347/1985:

> Art. 1º Regem-se pelas disposições desta Lei, sem prejuízo da ação popular, as ações de responsabilidade por danos morais e patrimoniais causados: (Redação dada pela Lei nº 12.529, de 2011).
> I - ao meio-ambiente;
> [...]

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

O dano moral coletivo, enquanto lesão na esfera imaterial de uma comunidade, diz respeito a uma "violação injusta e intolerável de valores fundamentais titularizados pela coletividade (grupos, classes ou categorias de pessoas)".[258]

No tocante ao dano moral coletivo, cabe ressaltar que a sua verificação não pode ser feita, pura e simplesmente, a partir dos mesmos pressupostos adotados na análise do dano individual, pois isso significaria abstrair as peculiaridades que distinguem direitos individuais e coletivos. O dano moral, nessa concepção, decorre da simples e direta violação das normas de proteção dos direitos.

Na esteira do dano moral coletivo, o dano extrapatrimonial ambiental é predominantemente objetivo, pois se procura proteger o bem ambiental em si (interesse objetivo) e não estritamente interesses particulares subjetivos. A dor, em sua acepção coletiva, é um valor equiparado ao sentimento moral individual, mas não propriamente este, posto que concernente ao macrobem ambiental, indivisível, de interesse comum e natureza existencial, solidário e relativo a um direito fundamental de toda coletividade. Ou seja, trata-se, ainda, de uma lesão que implica desvalorização imaterial ao meio ambiente ecologicamente equilibrado e concomitantemente a outros valores interrelacionados como a saúde e a qualidade de vida.

A lesão extrapatrimonial coletiva decorre da contribuição proporcional das emissões históricas e continuadas atribuíveis à empresa demandada para o agravamento dos eventos climáticos extremos que atingiram o estado do Rio Grande do Sul. Conforme demonstrado no item 3.1.2, a tragédia produziu 185 óbitos e 23 desaparecimentos, destruição de moradias e comunidades, deixou mais de 580 mil pessoas desalojadas no auge do evento, rompeu vínculos territoriais, familiares e comunitários de modo duradouro e comprometeu meios de subsistência com a degradação de cerca de 3,2 milhões de hectares de cultivo.

Registre-se, ademais, que o sofrimento psíquico coletivo encontra-se empiricamente documentado por estudo conduzido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul e pelo Hospital de Clínicas de Porto Alegre que identificou, entre os participantes atingidos,

[258] STJ. REsp. 1502967/RS, 3ª Turma, Rel. Min. Nancy Andrighi, julgado em 07/08/2018.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

1321312628

sintomas de depressão em 53%, sintomas de ansiedade em 51,9% e indicadores compatíveis com transtorno de estresse pós-traumático em 44,3%[259].

As consequências da tragédia atingiram, de forma difusa, a dignidade, a saúde, o bem-estar, a tranquilidade e a qualidade de vida das populações afetadas, justificando a reparação autônoma da dimensão moral coletiva do dano.

Como reflexo do princípio da reparação integral do dano ambiental, a jurisprudência do STJ também reconhece como indenizáveis, além da obrigação de restituir o meio ambiente lesado ao seu estado original, o dano moral coletivo (diminuição da qualidade de vida e de bem-estar da coletividade), os danos ditos reflexos ou remanescentes, que incluem o dano interino (intervalo de tempo entre a conduta danosa e a plena recuperação ambiental) e o dano residual (degradação irreversível que persiste, apesar das medidas de recuperação).[260]

A reparação do dano moral ambiental em caráter coletivo tem sido amplamente admitida pelo Superior Tribunal de Justiça. Nesse sentido:

> AMBIENTAL. DESMATAMENTO. CUMULAÇÃO DE OBRIGAÇÃO DE FAZER (REPARAÇÃO DA ÁREA DEGRADADA) E DE PAGAR QUANTIA CERTA (INDENIZAÇÃO). POSSIBILIDADE. INTERPRETAÇÃO DA NORMA AMBIENTAL.
> [...]
> 2. **A jurisprudência do STJ está firmada no sentido de que a necessidade de reparação integral da lesão causada ao meio ambiente permite a cumulação de obrigações de fazer e indenizar. Precedentes da Primeira e Segunda Turmas do STJ.**
> [...]
> 4. **A reparação ambiental deve ser feita da forma mais completa possível, de modo que a condenação a recuperar a área lesionada não exclui o dever de indenizar, sobretudo pelo dano que permanece entre a sua ocorrência e o pleno restabelecimento do meio ambiente afetado (= dano interino ou intermediário), bem como pelo dano moral coletivo e pelo dano residual (= degradação ambiental que subsiste, não obstante todos os esforços de restauração).**
> [...]
> 6. Recurso Especial parcialmente provido para reconhecer a possibilidade, em tese, de cumulação de indenização pecuniária com as obrigações de fazer voltadas à recomposição *in natura* do bem lesado, com a devolução dos autos ao Tribunal de origem para que verifique se, na hipótese, há dano indenizável e para fixar eventual quantum debeatur. (Grifos postos).[261]

[259] brasildefato.com.br/2025/04/17/ansiedade-transtorno-e-depressao-o-grito-silenciado-da-saude-mental-pos-enchente-no-rs/
[260] STJ. REsp. 1.145.083/MG, 2ª Turma, Min. Rel. Herman Benjamin, DJ de 04/09/2012
[261] REsp. 1.180.078 /MG. 2ª Turma. Rel. Min. Herman Benjamin. DJe de 28/02/2012.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

Quanto à comprovação do dano moral coletivo, a jurisprudência firmou-se no sentido de que o dano moral coletivo é aferível *in re ipsa*, dispensando a demonstração de dor, sofrimento, repulsa ou indignação dos membros da coletividade, por decorrer do próprio fato violador de direitos difusos::

> [...] é remansosa a jurisprudência deste Tribunal Superior no sentido de que o dano moral coletivo é aferível *in re ipsa*, dispensando a demonstração de prejuízos concretos e de aspectos de ordem subjetiva. O referido dano será decorrente do próprio fato apontado como violador dos direitos coletivos e difusos, por essência, de natureza extrapatrimonial, sendo o fato, por si mesmo, passível de avaliação objetiva quanto a ter ou não aptidão para caracterizar o prejuízo moral coletivo, este sim nitidamente subjetivo e insindicável[262]

No âmbito do Superior Tribunal de Justiça, o entendimento sobre a desnecessidade de prova do dano moral coletivo, uma vez demonstrada a ocorrência do dano ambiental, já é pacificado, tendo em vista que se tornou objeto de orientações consolidadas:

> (i) Configurado o dano ambiental, o dano moral coletivo é presumido, ou seja, independe de prova de dor, sofrimento, repulsa ou indignação da coletividade afetada.[263]
> (ii) O dano moral coletivo, aferível *in re ipsa*, é categoria autônoma de dano relacionado à violação injusta e intolerável de valores fundamentais da coletividade.[264]

Em sede de julgamento do REsp n. 2.200.069/MT, a Primeira Turma do STJ, além de reafirmar que os danos morais coletivos são aferíveis *in re ipsa* e não se confundem com sentimentos subjetivos de dor, sofrimento ou abalo psíquico da coletividade ou de grupo social específico, definiu parâmetros e fixou sete critérios objetivos para a análise de situações de lesão ao meio ambiente que possam justificar a condenação por danos morais coletivos:

> i) os danos morais coletivos não advêm do simples descumprimento da legislação ambiental, exigindo, diversamente, constatação de injusta conduta ofensiva à natureza;
>
> ii) **tais danos decorrem da prática de ações e omissões lesivas, devendo ser aferidos de maneira objetiva e *in re ipsa*, não estando atrelados a análises subjetivas de dor, sofrimento ou abalo psíquico da coletividade ou de um grupo social**;

[262] STJ. EREsp. 1342846/RS. Corte Especial, Rel. Min. Raul Araújo, DJe 03/08/2021.
[263] STJ. Jurisprudência em teses. Responsabilidade por Dano Ambiental II. n. 257. Brasília. 15 de abril de 2025, tese 7.
[264] STJ. Jurisprudência em teses. Responsabilidade Civil - Dano Moral. n. 125. Brasília. 17 de maio de 2019, tese 2.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

> iii) **constatada a existência de degradação ambiental, mediante alteração adversa das características ecológicas, presume-se a lesão intolerável ao meio ambiente e a ocorrência de danos morais coletivos, cabendo ao infrator o ônus de infirmar sua constatação com base em critérios extraídos da legislação ambiental**;
>
> iv) **a possibilidade de recomposição material do meio ambiente degradado, de maneira natural ou por intervenção antrópica, não afasta a existência de danos extrapatrimoniais causados à coletividade**;
>
> v) a avaliação de lesão imaterial ao meio ambiente deve tomar por parâmetro exame conjuntural e o aspecto cumulativo de ações praticadas por agentes distintos, impondo-se a todos os corresponsáveis pela macro lesão ambiental o dever de reparar os prejuízos morais causados, na medida de suas respectivas culpabilidades;
>
> vi) **reconhecido o dever de indenizar os danos morais coletivos em matéria ambiental (*an debeatur*), a gradação do montante reparatório (*quantum debeatur*) deve ser efetuada à vista das peculiaridades de cada caso e tendo por parâmetro a contribuição causal do infrator e sua respectiva situação socioeconômica; a extensão e a perenidade do dano**; a **gravidade da culpa e o proveito obtido com o ilícito**; e,
>
> vii) nos biomas arrolados como patrimônio nacional pelo art. 225, § 4º, da Constituição da República, o dever coletivo de proteção da biota detém contornos jurídicos mais robustos, havendo dano imaterial difuso sempre que evidenciada a prática de ações ou omissões que os descaracterizem ou afetem sua integridade ecológica ou territorial, independentemente da extensão da área afetada.[265] (Grifos nossos)

No caso em tela, verificam-se os sete critérios objetivos fixados pelo Superior Tribunal de Justiça:

i) a imputação não se funda em simples descumprimento da legislação ambiental, mas na contribuição causal, cientificamente demonstrada, para a degradação do sistema climático e, logo, para o agravamento do evento extremo;

ii) a aferição é objetiva e independe de análise de estados anímicos da coletividade, sem prejuízo da demonstração empírica já referida;

iii) constatada a degradação ambiental, presume-se a lesão intolerável, incumbindo à demandada o ônus de infirmá-la, o que reforça o pedido de inversão formulado adiante;

iv) a inviabilidade material de retorno ao *status quo ante*, longe de afastar o dano extrapatrimonial, acentua sua gravidade;

v) a lesão resulta do aspecto cumulativo de ações praticadas por agentes distintos, impondo-se a cada corresponsável o dever de, no mínimo, reparar parcialmente o dano, na

[265] STJ. REsp 2.200.069/MT. 1ª Turma. Min(a). Rel(a). Regina Helena Costa. DJ de 21/05/2025.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

13213428

medida de sua contribuição, critério que fundamenta, precisamente, a proporcionalidade adotada nesta demanda;

vi) a gradação do montante considera a contribuição causal da ré, sua situação econômica, a extensão e a perenidade do dano e o proveito obtido com a atividade, conforme adiante detalhado;

vii) tratando-se de afetação da Mata Atlântica, expressamente qualificada como patrimônio nacional pelo art. 225, § 4º, da Constituição, configura-se o dano imaterial difuso independentemente da extensão da área atingida, o que afasta qualquer objeção fundada na proporção da contribuição individual da demandada. Além disso, quanto ao Pampa, sua relevante biodiversidade e sua proteção pelo regime geral do art. 225 da Constituição igualmente evidenciam a gravidade da lesão imaterial difusa decorrente da alteração de sua integridade ecológica.

Mostra-se configurado, portanto, à luz da doutrina e da jurisprudência o dever da demandada de indenizar os danos morais coletivos ambiental-climáticos.

É importante salientar que o arbitramento da indenização deve atender não apenas à **<u>função compensatória</u>**, mas também à **<u>natureza punitivo-pedagógica</u>** da responsabilidade civil ambiental. O entendimento do STJ acerca da natureza da responsabilidade civil por dano ambiental se transformou em tese consolidada:

> A responsabilidade civil por dano ambiental tem natureza reparatória e punitivo-pedagógica.[266]

Além da admissibilidade do dano moral coletivo em si mesmo, os eventos climáticos extremos versados nos autos se encaixam perfeitamente nas hipóteses de reparação civil por danos sociais, mediante acréscimo em razão de *punitive damages,* tendo em vista a violação à dignidade das pessoas e a ofensa causada à vida da coletividade como um todo, em razão da lesão ao bem ambiental, cujo equilíbrio se revela indispensável à qualidade de vida e bem-estar coletivos.

A gravidade da conduta, para fins de arbitramento, decorre da manutenção e expansão de modelo de negócios intensivo em carbono apesar do conhecimento próprio e

[266] STJ. Jurisprudência em teses. Responsabilidade por Dano Ambiental II. n. 257. Brasília. 15 de abril de 2025, tese 3.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

13213426628

documentado dos riscos climáticos dele decorrentes, circunstância que, independentemente de qualquer indagação sobre culpa, que o regime de responsabilidade objetiva dispensa, qualifica a **censurabilidade da atuação** e deve ser considerada na fixação do *quantum*, nos termos do critério (vi) do precedente referido. A referência à culpa, portanto, não descaracteriza a natureza objetiva da responsabilidade ambiental. Opera apenas como critério de majoração quando o poluidor, estando ou devendo estar ciente dos riscos de sua atividade à luz do conhecimento científico disponível, deixa de agir de forma responsável para evitá-los.

O arbitramento dos valores a título de danos morais coletivos deve buscar impedir que a degradação seja tratada como mero custo ordinário da atividade econômica e desestimular a continuidade de condutas empresariais incompatíveis com a proteção das presentes e futuras gerações.

A fixação do montante deve observar assim alguns parâmetros:.

a) a contribuição causal do infrator, nas emissões cumulativas globais de CO2 de combustíveis fósseis e cimento, correspondente a 41.517 MtCO2e;
b) a situação socioeconômica, considerando os lucros da ordem de US$ 120 bilhões apurados pelo grupo nos últimos cinco anos, o que demonstra, a um só tempo, a ausência de excesso e a necessidade de patamar expressivo para a produção de efeito dissuasório real;
c) a extensão e a perenidade do dano, 185 óbitos, 478 municípios atingidos, mais de 100 mil unidades residenciais danificadas, infraestruturas atingidas, 3,2 milhões de hectares de solos degradados, cuja recuperação demandará anos e a persistência de pessoas ainda sem moradia definitiva, mais de dois anos após o evento.
d) os resultados econômicos auferidos com a exploração, produção e comercialização dos combustíveis cuja queima gerou as emissões, apropriados privadamente enquanto os custos correspondentes recaíram sobre a coletividade e o erário brasileiros.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

e) o efeito dissuasório às externalidades ambientais causadas pela atividade poluidora, parâmetro expressamente imposto ao magistrado pelo art. 14 da Resolução CNJ nº 433/2021.

As empresas de combustíveis fósseis, há décadas, são detentoras de conhecimento sobre as consequências climáticas de suas atividades. No já mencionado caso *Lliuya vs. RWE,* a Corte Superior Regional de Hamm reconheceu que, ao menos desde meados da década de 1960, era objetivamente previsível, para uma grande empresa produtora de energia, que as emissões da empresa poderiam conduzir ao aumento da temperatura média global.

Além disso, a Corte afirmou que desde novembro de 1988, com a criação do IPCC, as relações de causas e efeitos das mudanças climáticas são de conhecimento público e, desde meados da década de 1960, para um observador ideal na função de um produtor de energia era previsível que as emissões antropogênicas de GEE levariam ao aquecimento global e às consequências associadas:

> Desde o início do século XX, não era completamente improvável para uma empresa como a ré [e certamente não seria para uma petroleira multinacional] que as emissões de CO_2 pudessem levar a um aumento global da temperatura e, consequentemente, ao derretimento das geleiras. De qualquer forma, desde novembro de 1988, com o estabelecimento do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o público havia sido informado sobre a relação de causa e efeito da mudança climática em questão por meio da cobertura da mídia.[267]
>
> Com base em fatos de conhecimento geral (§ 291 ZPO), o Senado está convencido de que já era previsível em meados da década de 1960 para um observador ideal na função de um produtor de energia que as emissões antropogênicas de GEE levariam ao aquecimento global e às consequências associadas.[268]

Se a previsibilidade é exigível de empresa de geração de energia elétrica, com maior razão é de companhia petrolífera multinacional, cujo objeto social consiste precisamente na exploração, produção e comercialização dos combustíveis cuja queima gera as emissões de elevadas quantidades de gás carbônico e metano.

Registre-se, ademais, a consequência quantitativa do marco fixado pelo Tribunal alemão: se, desde novembro de 1988, com a criação do IPCC, a relação de causa e efeito das

---

[267] Tradução livre. Página 5 da decisão judicial, disponível em https://www.climatecasechart.com/document/luciano-lliuya-v-rwe-ag_dd33.

[268] Tradução livre. No original: Página 44 da decisão judicial, disponível em https://www.climatecasechart.com/document/luciano-lliuya-v-rwe-ag_dd33.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

mudanças climáticas tornou-se de conhecimento público, e se, conforme o Relatório Síntese do AR6 transcrito no item 4.2.5.2.1, aproximadamente 42% das emissões líquidas ocorreram entre 1990 e 2019, tem-se que quase metade das emissões históricas foi produzida em contexto de risco publicamente conhecido.

No caso da Shell, há elementos documentais específicos. Relatório interno elaborado pela companhia em 1986 já reconhecia que as alterações projetadas poderiam figurar entre as maiores da história registrada[269]. Em 1991, a Shell produziu e divulgou o documentário *Climate of Concern*[270], destinado inclusive a escolas e universidades, no qual advertia que a continuidade da utilização de energia fóssil poderia provocar aumento da temperatura global, eventos meteorológicos extremos, inundações, elevação do nível do mar, perda de áreas agricultáveis, fome e deslocamentos populacionais, ressaltando, ainda, que aguardar uma comprovação definitiva antes de agir seria irresponsável.

As advertências então formuladas pela própria demandada descrevem, com precisão, o que veio a ocorrer no Rio Grande do Sul em 2024, precipitações extremas, inundações e deslocamento forçado de população. Apesar desse conhecimento, o modelo de negócios intensivo em carbono foi mantido e expandido.

Esse conhecimento institucional também constitui elemento expressamente invocado na recente demanda climática proposta pela ONG Milieudefensie contra a Shell. A síntese da petição[271] registra que, **há mais de 35 anos, a companhia já havia identificado, mediante pesquisas próprias, os graves perigos que as mudanças climáticas poderiam impor à humanidade e que, ao menos desde a década de 1980, tinha ciência do papel desempenhado por suas atividades tanto na causação quanto na prevenção desses danos.**

Diante desse cenário, e considerando os parâmetros acima expostos, requer-se a condenação da ré ao pagamento de valor a título de dano moral coletivo ambiental-climático,

---

[269] Disponível em: https://brasil.elpais.com/brasil/2017/02/28/internacional/1488274335_818249.html
[270] Disponível em: https://www.theguardian.com/environment/2017/feb/28/shell-knew-oil-giants-1991-film-warned-climate-change-danger
[271] Disponível em: https://www.climatecasechart.com/document/milieudefensie-et-al-v-shell-plc-no-new-oil-and-gas-fields-case_56e9

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161
13213126128

para o qual adota-se como critério o valor equivalente ao estimado a título de danos materiais. Tal montante constitui uma fração diminuta dos resultados econômicos do grupo no último quinquênio, situando-se em patamar compatível com a gravidade da lesão e suficiente à produção do efeito dissuasório exigido pelo art. 14 da Resolução CNJ nº 433/2021.

Referido valor deverá ser destinado a fundo, conta judicial, instrumento financeiro específico ou estrutura de reparação determinada por este Juízo, com aplicação vinculada a medidas de reparação coletiva, adaptação climática, prevenção de desastres, fortalecimento da resiliência territorial, proteção de populações atingidas e garantia de não repetição, preferencialmente com gestão por Assessoria Técnica Independente, participação social das comunidades afetadas, fiscalização judicial e acompanhamento do Ministério Público Federal.

A destinação postulada atende integralmente ao art. 13 da Lei nº 7.347/85, com a vantagem da vinculação territorial e finalística aos locais efetivamente atingidos, modelo consolidado na experiência brasileira de reparação de desastres de grande magnitude, notadamente nos casos de Mariana e Brumadinho, em que se estruturaram instrumentos financeiros específicos com participação das comunidades atingidas e assessoramento técnico independente.

4.2.9. Direito à participação informada e da Assessoria Técnica Independente (ATI) aos atingidos

A condenação pecuniária postulada, a título de dano material coletivo e de dano moral coletivo, tem natureza difusa e, por isso, não se exaure na transferência de recursos: exige destinação funcionalmente vinculada à reconstituição dos bens lesados, nos termos do art. 13 da Lei nº 7.347/85.

Os valores deverão ser destinados a instrumento financeiro específico, sob fiscalização judicial, com aplicação vinculada e exclusiva a medidas de reparação, reconstrução, adaptação climática, prevenção de desastres e proteção das populações atingidas no Estado do Rio Grande do Sul, mediante plano de aplicação elaborado com apoio

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

de Assessoria Técnica Independente, submetido à aprovação deste Juízo, ouvidos os autores e assegurada a participação das comunidades atingidas.

Tratando-se de danos climáticos que afetaram de forma ampla e desigual populações urbanas, rurais, periféricas, ribeirinhas, tradicionais, trabalhadores, agricultores, comerciantes, crianças, idosos e demais grupos vulnerabilizados. A definição das prioridades de aplicação dos recursos deve, por isso, apoiar-se em diagnóstico participativo dos territórios afetados, e não em deliberação unilateral dos autores ou do réu.

O direito à participação informada em matéria ambiental decorre do art. 225, *caput*, da Constituição, que atribui o dever de defesa do meio ambiente ao Poder Público e à coletividade e é densificado pelo Princípio 10 da Declaração do Rio (1992)[272], pelo art. 4º, VI da Lei nº 12.608/2012, que erige a participação da sociedade em diretriz da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, e, no que couber, o art. 3º, V da Lei nº 14.755/2023 e a Convenção nº 169 da OIT (Decreto nº 10.088/2019) quanto às comunidades tradicionais atingidas.

A Assessoria Técnica Independente destina-se a assegurar que as pessoas e comunidades atingidas participem de forma informada, qualificada e efetiva da definição das prioridades de reparação, mediante apoio técnico. Sua atuação compreende a identificação dos danos materiais, territoriais, ambientais, econômicos, sociais, culturais e comunitários decorrentes da tragédia, bem como a elaboração participativa, o monitoramento e a revisão de planos de reparação e adaptação compatíveis com as necessidades concretas dos territórios afetados.

A instituição de ATI também se justifica pela complexidade técnica e interdisciplinar da reparação devida. A reconstrução e a reparação não se limita à recomposição patrimonial imediata, exige diagnóstico interdisciplinar sobre riscos futuros e vulnerabilidades territoriais, abrange infraestrutura urbana e rural, reassentamentos, habitação, saneamento e segurança

[272] Princípio 10. A melhor maneira de tratar as questões ambientais é assegurar a participação, no nível apropriado, de todos os cidadãos interessados. No nível nacional, cada indivíduo terá acesso adequado às informações relativas ao meio ambiente de que disponham as autoridades públicas, inclusive informações acerca de materiais e atividades perigosas em suas comunidades, bem como a oportunidade de participar dos processos decisórios. Os Estados irão facilitar e estimular a conscientização e a participação popular, colocando as informações à disposição de todos. Será proporcionado o acesso efetivo a mecanismos judiciais e administrativos, inclusive no que se refere à compensação e reparação de danos.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

hídrica, saúde e assistência social, recuperação ambiental, sistemas de alerta e prevenção de desastres, demais medidas de adaptação climática, com atenção prioritário aos grupos em situação de maior exposição.

A Assessoria Técnica Independente deverá ser escolhida por procedimento público, transparente e participativo, com consulta às comunidades atingidas e observância de critérios de capacidade técnica, experiência em reparação coletiva, independência institucional, ausência de conflito de interesses, atuação multidisciplinar e compromisso com metodologias participativas. A ATI não poderá ter vínculo econômico, contratual ou institucional com a ré, com empresas do mesmo grupo econômico ou com entidades que possam comprometer sua autonomia.

O procedimento de escolha será conduzido sob supervisão do Juízo, facultada às comunidades atingidas a indicação e a manifestação sobre as entidades habilitadas, preferencialmente instituições públicas de ensino e pesquisa, organizações da sociedade civil ou consórcios multidisciplinares com experiência comprovada em reparação coletiva.

O custeio da Assessoria Técnica Independente correrá integralmente por conta da ré, em parcela autônoma e adicional, vedado o abatimento dos valores da condenação, sob pena de redução indevida da reparação devida à coletividade.

A atuação da ATI se estenderá por todo o período de execução do plano de aplicação, admitidas a prorrogação e a substituição por decisão judicial, ouvidos os autores e as comunidades atingidas, na hipótese de descumprimento, perda de independência ou insuficiência técnica.

A atuação da ATI deverá compreender, entre outras atribuições:

a) realizar diagnóstico participativo dos danos e das prioridades de reparação nos territórios atingidos;

b) prestar apoio técnico às comunidades afetadas, garantindo compreensão adequada dos seus direitos e das medidas de reparação propostas;

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

c) formular, em conjunto com as comunidades, planos de reparação, reconstrução, compensação, adaptação climática e prevenção de novos desastres;

d) acompanhar a execução dos recursos e das medidas aprovadas judicialmente;

e) elaborar relatórios periódicos de monitoramento físico-financeiro, com linguagem acessível e ampla publicidade;

f) propor ajustes nos planos de reparação sempre que identificadas novas necessidades, insuficiências ou mudanças no contexto territorial;

g) propor parâmetros de aplicação orientados por critérios de justiça climática, prioridade a grupos vulnerabilizados e redução efetiva de riscos futuros.

A destinação vinculada dos recursos e a atuação da Assessoria Técnica Independente não substitui as atribuições constitucionais e legais do Poder Público, e tampouco afasta a responsabilidade dos entes federativos pela formulação e execução de políticas públicas de reconstrução, prevenção e adaptação climática. Trata-se de mecanismo complementar de efetivação da reparação civil ambiental-climática, destinado a garantir que os recursos oriundos da condenação privada sejam aplicados de forma transparente, tecnicamente adequada, participativa e orientada às necessidades das populações atingidas.

Requer-se, portanto, que a sentença determine:

a) que os valores decorrentes da condenação por danos materiais e danos morais coletivos sejam destinados a instrumento financeiro específico, vinculação exclusiva a medidas de reparação, reconstrução, compensação, adaptação climática, prevenção de desastres e proteção das populações atingidas no Estado do Rio Grande do Sul;

b) a designação de Assessoria Técnica Independente, custeada pela ré, escolhida de forma participativa e transparente, para prestar apoio técnico às comunidades atingidas na elaboração, no monitoramento e na revisão do plano de aplicação;

13213426228

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

c) a submissão do plano de aplicação à aprovação Juízo, acompanhamento do Ministério Público Federal e assegurada a participação das comunidades atingidas,

4.2.10. Inversão do ônus da prova

A presente ação civil pública tem como causa de pedir a degradação da qualidade ambiental e demais consequências danosas decorrentes das emissões de GEE atribuíveis à exploração petrolífera levada a efeito pela demandada, nos termos do artigo 3º, incisos III e IV, e do artigo 14, § 1º, da Lei nº 6.938/1981, de sorte que, em seu cerne, figura a ocorrência de violação a bens jurídicos ambientais de conteúdo difuso e a vulnerabilidade, hipossuficiência técnica e informacional de grande parte da coletividade afetada.

É instrumentada por farto acervo probatório, constituído por estudos científicos dotados de metodologia clara, objetiva e consolidada internacionalmente, o que evidencia a contribuição causal da ré para o agravamento, em proporção mensurável, dos eventos climáticos extremos que assolaram o estado do Rio Grande do Sul, em especial o Vale do Taquari, bem como os danos deles decorrentes.

Tendo os autores trazido aos autos provas científicas sólidas e abundantes, (i) chanceladas por painéis científicos multinacionais, compostos pelos mais eminentes cientistas especializados do planeta, e (ii) expressamente reconhecidos como melhor ciência disponível, em diversas jurisdições, por Cortes de expressão internacional, recai sobre o réu o ônus de, se for o caso, desfazer tais premissas e de provar, portanto, que a atividade por ele desenvolvida não possui qualquer relação, direta ou indireta, com o dano ambiental invocado ou que este não foi por ele causado ou agravado.

Invertido o ônus, não bastará à demandada alegar incerteza científica. Caberá à ré demonstrar que sua atividade não guarda a relevância causal afirmada, ou que os percentuais de participação nas emissões cumulativas não correspondem à realidade, observando a capacidade técnica e econômica de que é detentora. Persistindo incertezas residuais diante de verossimilhança e de probabilidade suficiente, a dúvida deve ser resolvida em favor do meio ambiente e da população atingida (*in dubio pro natura*).

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

15234268

Nesse sentido, o STJ consolidou, por meio da Súmula n. 618, o entendimento de que é cabível a inversão do ônus da prova nas demandas que versem sobre degradação ambiental, a partir de interpretação conjugada do artigo 6º, inciso VIII, do CDC c/c o artigo 21 da Lei nº 7.347/1985, dos princípios da precaução e do *in dubio pro natura*:

> **Súmula 618 do STJ: "A inversão do ônus da prova aplica-se às ações de degradação ambiental".**
>
> Os princípios da precaução e do *in dubio pro natura* servem de fundamento para a inversão do ônus probatório, de modo a atribuir a quem supostamente promoveu o dano ambiental a prova de que não o causou ou de que a substância lançada ao meio ambiente não lhe é potencialmente lesiva.[273]
>
> O agente, ao criar ou assumir o risco de danos ambientais, tem o dever de reparar os danos causados e, em tal contexto, o ônus de provar que sua conduta não foi lesiva.[274]

A inversão encontra fundamento, ademais, no art. 373, § 1º, do Código de Processo Civil, que autoriza a distribuição diversa do ônus diante de peculiaridades da causa relacionadas à excessiva dificuldade de cumprimento do encargo ou à maior facilidade de obtenção da prova do fato contrário pela parte adversa.

No plano internacional, a Corte IDH ao formular o PC 32/2025, também dispôs quanto à necessidade de inversão do ônus da prova em litígios climáticos. O tema é tratado no âmbito das obrigações dos Estados derivadas de direitos processuais relativos ao enfrentamento das mudanças climáticas:

> 552. **A Corte observa que, dada a complexidade inerente aos litígios climáticos, a aplicação estrita de certas disposições gerais sobre provas pode constituir um obstáculo injustificado para o acesso efetivo à justiça**. Nesse contexto, **cabe às autoridades judiciais adotar uma abordagem que leve em consideração as particularidades próprias deste tipo de litígios, como as dificuldades para comprovar a relação causal entre o dano e sua origem, a assimetria no controle e acesso aos meios probatórios — incluindo as provas via satélite — bem como a concentração de informações técnicas em atores com maiores capacidades institucionais ou econômicas**. Esses elementos exigem uma interpretação das regras probatórias conforme os princípios de disponibilidade da prova, cooperação processual, pro persona, pro natura e pro actione.
>
> 553. Em relação ao primeiro desses aspectos, a Corte observa que o acesso à justiça exige a adoção de padrões probatórios alternativos que permitam estabelecer a

[273] STJ. Jurisprudência em teses. Direito Ambiental. n. 30. Brasília. 18 de março de 2015, tese 4.
[274] STJ. Jurisprudência em teses. Responsabilidade por dano ambiental II. n. 257. Brasília. 15 de abril de 2025, tese 5.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

> relação causal, com base na melhor ciência disponível, a partir da geração ou tolerância de riscos significativos pela omissão de medidas de prevenção, e a exposição efetiva de pessoas ou grupos a tais riscos, sem exigir necessariamente a prova de um vínculo causal direto. Nesse sentido, **este Tribunal chama a atenção para a possibilidade de presumir o vínculo causal entre as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a degradação do sistema climático, assim como entre essa degradação e os riscos que ela gera sobre os sistemas naturais e as pessoas**.
>
> 554. No mesmo sentido exposto acima, **a Corte considera que as disposições relativas à admissibilidade, validade e avaliação da prova devem ser interpretadas de maneira flexível, a fim de evitar que essas normas se tornem barreiras processuais injustificadas para as vítimas, especialmente para aquelas em situação de vulnerabilidade, no contexto da emergência climática**. **Isso exige uma avaliação particularizada das possíveis assimetrias entre as partes e a adoção de medidas adequadas — como a inversão do ônus da prova — para garantir o acesso efetivo à justiça**. (grifos nossos)

A assimetria probatória, na espécie, é concreta e identificável. Encontram-se sob domínio exclusivo da demandada e do grupo econômico de que integra os dados desagregados de produção histórica, os inventários próprios de emissões (inclusive de escopo 3), os estudos internos sobre os efeitos climáticos da utilização de combustíveis fósseis, a documentação relativa à estrutura de governança corporativa e à integração operacional da subsidiária brasileira, bem como informações sobre os resultados econômicos da operação.

5. DOS PEDIDOS

Posto isso, requer:

a) o recebimento da presente Ação Civil Pública, com o reconhecimento de sua natureza de litígio climático;

b) a citação da empresa ré para, querendo, apresentar contestação, sob pena de revelia e demais efeitos legais;

c) nos termos do art. 319, VII, do CPC, os autores manifestam interesse na realização de audiência de conciliação ou de mediação, apenas se houver manifestação expressa da ré nesse sentido;

d) a inversão do ônus da prova, com fundamento no art. 6º, VIII, do Código de Defesa do Consumidor, no art. 21 da Lei nº 7.347/1985, no art. 373, § 1º, do

13213426283

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

Código de Processo Civil, na Súmula n. 618/STJ, nos princípios da precaução, do *in dubio pro natura* e do *in dubio pro ambiente*;

e) a intimação da União, através da Advocacia Geral da União, nos termos do art. 121 do CPC para, querendo, habilitar-se no processo;

f) a intimação do Instituto de Direito Coletivo - IDC, associação civil sem fins lucrativos, inscrita no CNPJ sob o n. 29.805.150/0001-54, observadora junto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima[275], a fim de que, querendo, habilite-se no feito nos termos dos arts. 124 ou 138 do CPC, sem prejuízo do ingresso ulterior de outras entidades;

g) ao final, seja julgada **TOTALMENTE PROCEDENTE** a presente Ação Civil Pública a fim de:

i) **declarar** a existência de nexo causal entre as emissões históricas e continuadas de gases de efeito estufa atribuíveis à ré, o aquecimento global antropogênico, a intensificação dos eventos climáticos extremos que atingiram o Estado do Rio Grande do Sul entre abril e maio de 2024 e os danos ambientais, sociais, econômicos, territoriais e morais coletivos deles decorrentes, na proporção da contribuição causal apurada;

ii) **declarar** a responsabilidade civil ambiental-climática da ré pelos danos decorrentes de sua contribuição histórica e cumulativa para as emissões globais de CO2 provenientes de combustíveis fósseis e cimento, sem prejuízo da natureza multicausal da crise climática e da responsabilidade solidária dos demais poluidores diretos ou indiretos;

iii) **condenar** a ré à reparação parcial do dano, mediante o pagamento de indenização por danos materiais ambientais-climáticos, estimada inicialmente em R$270.518.400,00 (duzentos e setenta milhões, quinhentos e dezoito mil e quatrocentos reais) e a ser apurada em liquidação de sentença, fixando, desde logo, os seguintes critérios de

[275] Disponível: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cp2025_03E.pdf.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

quantificação: (i) a base pública de custos, despesas, repasses, renúncias fiscais, desonerações e valores direta ou indiretamente destinados à resposta, recuperação, reconstrução, adaptação e mitigação dos danos decorrentes das enchentes de 2024 no Estado do Rio Grande do Sul, conforme discriminação constante do item 4.2.7; (ii) o fator de 12%, adotado como critério de imputação proporcional, correspondente ao acréscimo de intensificação do evento extremo atribuída às mudanças climáticas antropogênicas, conforme o estudo de atribuição referido; e (iii) percentual de 2,02% de participação nas emissões cumulativas globais de CO2 provenientes de combustíveis fósseis e cimento, conforme dados da plataforma *Carbon Majors*;

iv) **condenar** a demandada ao pagamento de 270.518.400,00 (duzentos e setenta milhões, quinhentos e dezoito mil e quatrocentos reais) a título de dano moral coletivo ambiental-climático, observados os parâmetros expostos no item 4.2.8 e o critério fixado pelo Superior Tribunal de Justiça no REsp 2.200.069/MT;

v) **determinar** que os valores decorrentes da condenação sejam destinados a um instrumento financeiro específico, sob fiscalização deste Juízo, com aplicação vinculada e exclusiva a medidas de reparação, reconstrução, compensação, adaptação climática, prevenção de desastres e proteção das populações atingidas no Estado do Rio Grande do Sul, mediante plano de aplicação elaborado com apoio de Assessoria Técnica Independente, submetido à aprovação judicial, ouvidos os autores e assegurada a participação das comunidades atingidas; devendo a Assessoria Técnica Independente ser escolhida por procedimento público, transparente e participativo, vedado qualquer vínculo econômico, contratual ou institucional com a ré ou com integrantes de seu grupo econômico, e custeada pela demandada em obrigação autônoma, tudo a ser operacionalizado em sede de cumprimento de sentença;

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

h) seja admitida a produção de todos os meios de prova em direito admitidos, especialmente prova documental suplementar, pericial, técnica, científica, testemunhal e demais provas necessárias à adequada demonstração da responsabilidade civil ambiental-climática da ré e à quantificação dos danos materiais e morais coletivos.

Dá-se à causa o valor de R$ 541.036.800,00 (quinhentos e quarenta e um milhões, trinta e seis mil e oitocentos reais).

Caxias do Sul e Porto Alegre, *na data da assinatura eletrônica.*

FLÁVIA RIGO NÓBREGA
Procuradora da República

FABIANO DE MORAES
Procurador da República

THALES ZENDRON MIOLA
OAB/127.449

13213426628

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

MPF
Ministério Público Federal

instituto preservar

ROL DE DOCUMENTOS ANEXOS

1. Procuração do Instituto Preservar;
2. Estatuto Social do Instituto Preservar;
3. Ata de Assembleia do Instituto Preservar;
4. Laudo Técnico nº 225/2025 ANPEA/SPPEA/PGR;
5. Relatório Síntese do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (Versão traduzida realizada pelo Governo do Brasil e pelo Pacto Global da ONU no Brasil);
6. Carbon Majors 2024 Data Update – January 2026;
7. Tradução juramentada integral do Relatório Carbon Majors 2024 Data Update – January 2026;
8. Climate change and El Niño behind extreme precipitation leading to major floods in southern Brazil in 2024;
9. Tradução juramentada integral do estudo de Clarke et al., *Climate change and El Niño behind extreme precipitation leading to major floods in southern Brazil in 2024*;
10. ARTAXO, Paulo. *Da mudança climática à responsabilidade: a ciência da atribuição dos eventos extremos*. Parecer técnico-científico. 13 p
11. Relatório PNUMA 2026: *Limiting Overshoot - Navigating exceedance of 1.5°C and pathways towards return*
12. Infográfico “Responsabilidade ambiental-climática: A cadeia causal entre emissões de GEE, agravamento do evento extremo e danos no Rio Grande do Sul”.

13213426628

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 08/10/2026 18:33. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL

Assinatura/Certificação do documento **PRM-CAX-RS-00008158/2026 PETIÇÃO**

Signatário(a): **FLAVIA RIGO NOBREGA**
Data e Hora: **08/10/2026 18:33:54**
Assinado em nuvem

Signatário(a): **THALES ZENDRON MIOLA**
Data e Hora: **08/10/2026 18:35:31**
Assinado com login e senha

Signatário(a): **FABIANO DE MORAES**
Data e Hora: **08/10/2026 18:47:41**
Assinado em nuvem serpro

Acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave 1ba674bf.b35fdabb.e5dbe650.e1e9a161

PROCURAÇÃO

OUTORGANTE:

INSTITUTO PRESERVAR, associação civil, com sede na RS 040, Km 20, s/n, no Assentamento Filhos de Sepé, interior do município de Viamão/RS, inscrita no CNPJ sob n. 05.858.859/001-50, neste ato representada por seu Coordenador Geral **MAURICIO ROMAN,** brasileiro, casado, agricultor, residente na Rua Rafael Lima, 270, Centro, no Município de Nova Santa Rita/RS.

OUTORGADO:

THALES ZENDRON MIOLA, brasileiro, advogado, inscrito na OAB/RS nº 127.449, residente e domiciliado à Rua General João Telles, n. 285, Bairro Bom Fim, Porto Alegre/RS.

PODERES: Por este instrumento particular de mandato, o/a Outorgante nomeia e constitui seu procurador o Outorgado, conferindo-lhe os poderes das cláusulas *ad judicia* e extra *judicia* mais os especiais de transigir, conciliar, desistir, receber pagamentos e dar quitação, substabelecer com ou sem reserva de poderes, podendo ainda agir no foro em conjunto ou separadamente, para o fim de representar os interesses do/a Outorgante, como autor/a ou como réu. Conferindo-lhe o poder, especial, de representar os interesses do/a Outorgante no ajuizamento de Ação Civil Pública em face da Shell Brasil Petróleo Ltda. na Justiça Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 07 de outubro de 2026

MAURICIO ROMAN
INSTITUTO PRESERVAR

instituto preservar

Estatuto Social
INSTITUTO PRESERVAR

Capítulo I - Da Denominação, sede, área de ação, duração, ano social e objetivos

Art. 1º - O INSTITUTO PRESERVAR, com a sigla PRESERVAR, é uma associação civil, sem fins lucrativos, de duração indeterminada, ano social compreendendo 01 de janeiro à 31 de dezembro de cada ano, com sede e foro no município de Viamão, RS, compreendendo todo o território do Estado do Rio Grande do Sul para efeito de admissão de associados e implementação de seus objetivos.

Parágrafo único: O Instituto Preservar não distribui entre os seus sócios ou associados, conselheiros, diretores, empregados, doadores ou terceiros, eventuais resultados, sobras, excedentes operacionais, brutos ou líquidos, dividendos, isenções de qualquer natureza, participações ou parcelas do seu patrimônio, auferidos mediante o exercício de suas atividades, aplicando-os integralmente na consecução do respectivo objeto social, de forma imediata ou por meio da constituição de fundo patrimonial ou fundo de reserva, observada a legislação aplicável (Lei nº 13.019, de 2015).

Art. 2º - O INSTITUTO PRESERVAR tem por objetivos:

I - Atuar na defesa, preservação e conservação do meio ambiente, incentivas a agroecologia e promover a visão sistêmica da produção e o desenvolvimento sustentável.

II - Estimular o desenvolvimento rural e a melhoria das condições de vida do homem e da mulher do campo, da infância à velhice, e de suas comunidades.

III - Estimular o desenvolvimento comunitário e cultural das comunidades rurais.

IV - Estimular o desenvolvimento de tecnologias alternativas na agricultura e na comunidade rural, e as socializar.

V - Desenvolver atividades de caráter sócio-ambiental relacionadas à questão da agricultura, meio ambiente e reforma agrária.

VI - Estimular o desenvolvimento de formas de cooperação no trabalho e na produção agrícola.

VII - Desenvolver ações que contribuam na alfabetização, na educação e escolarização, na formação e na capacitação técnica do povo do campo.

VIII - Desenvolver ações que busquem construir novas relações de gênero e superar discriminações, como o racismo.

IX - Desenvolver atividades específicas com a infância, a adolescência e a juventude do campo.

X - Promover pesquisas e estudos que visam contribuir para o desenvolvimento do campo.

XI - Apoiar iniciativas relacionadas com a promoção e a realização da reforma agrária

XII - Estimular o resgate cultural e a socialização da sabedoria do povo do campo, especialmente nas áreas de saúde e expressões artísticas.

XIII - Defender os interesses sociais e econômicos de seus associados.

Art. 3º - Para a realização de seus objetivos o INSTITUTO PRESERVAR deverá:

I - Viabilizar cursos de formação e escolarização nas mais diversas áreas que visem o desenvolvimento da pessoa humana e a sua capacitação técnica.

II - Prestar assessorias na área de administração, projetos rurais e assistência técnica aos pequenos agricultores, bem como associações, cooperativas e entidades.

III - Promover o intercâmbio com entidades nacionais e internacionais.

IV - Realizar edição e publicação de materiais, tais como: cartazes, cartilhas, manuais, livros, folhetos, boletins, fitas de vídeo, CD, entre outros.

V - Promover visitas técnicas e socialização de experiências.

VI - Realizar encontros, palestras, seminários e oficinas.

VII - Promover atividades artísticas e culturais no e do campo.

VIII - Montar uma biblioteca de apoio às suas atividades.

Art. 4º - Para a melhor consecução de seus objetivos o INSTITUTO PRESERVAR poderá:

I - Celebrar convênios com universidades, escolas técnicas ou profissionalizantes, educação média, educação fundamental, educação infantil e educação de jovens e adultos.

II - Celebrar convênios com outras entidades e órgãos públicos Municipais, Estaduais e Federais que se destinem a atender seus objetivos.

III - Receber doações em dinheiro ou bens, de pessoas, entidades ou organismos públicos, privados, nacionais e internacionais.

IV - Realizar atividades econômicas produtivas em área própria ou cedida por terceiros.

Capítulo II - Dos sócios, seus direitos e deveres

Art. 5º – Poderão ingressar no INSTITUTO PRESERVAR os pequenos agricultores, assentados, trabalhadores rurais e profissionais, independente do gênero, que assumam os seus objetivos e que sejam apresentados por um sócio fundador.

Parágrafo Primeiro: São sócios fundadores os que assinarem a ata de constituição.

Parágrafo Segundo: O ingresso de novos sócios se dará através de carta a direção e ratificação pela assembléia geral.

Parágrafo Terceiro: Poderão se associar entidades como associações e cooperativas e as mesmas deverão apresentar por carta o seu representante.

Art. 6º - Os sócio quites com a tesouraria do Instituto tem os seguintes direitos:

I - Participar das assembléias.

II - Votar e ser votado nas eleições para membros da Direção ou do Conselho Fiscal.

III - Solicitar à direção executiva informações sobre as atividades do Instituto

IV - Participar das atividades e usufruir de todos os serviços oferecidos pelo Instituto.

V - Recorrer a qualquer decisão da diretoria executiva.

VI - Requerer a convocação da assembléia geral, mediante a apresentação de ⅓ de assinaturas dos sócios.

VII - Demitir-se do Instituto quando lhe convier.

Art. 7º - Os sócios têm as seguintes obrigações:

I - Cumprir o estatuto, os regulamentos e as disposições internas do Instituto.

II - Exercer os cargos para os quais foram eleitos, salvo casos de impedimento justificado.

III - Colaborar com iniciativas do Instituto e prestar as informações relacionadas às suas necessidades.

IV - Cumprir com suas obrigações financeiras de taxas a serem fixadas.

V - Contribuir para difusão das atividades do Instituto.

VI - Zelar pelo bom funcionamento do Instituto e o cumprimento dos seus objetivos.

VII - Respeitar os demais sócios em sua raça, religião e opção político-partidária.

Art. 8º - A substituição de representante, no caso de sócio-entidade, poderá acontecer a pedido da Direção do Instituto, mediante justificativa, ou por decisão da entidade interessada.

Art. 9º - A demissão do sócio será somente a seu pedido.

Art. 10º - O desligamento será feito pela Direção caso o sócio infringir as disposições deste estatuto ou demais determinações da entidade, propondo sanções caso necessário, cabendo ao sócio recorrer a assembléia geral.

Capítulo III - Da gestão

Art 11º - São poderes do Instituto:

I - Assembléia geral.

II - Direção.

III - Conselho fiscal.

Parágrafo Único: O INSTITUTO PRESERVAR não remunera os membros da direção ou conselho fiscal pelo exercício de seus cargos e o "superávit" eventualmente verificado em exercício financeiro será aplicado na obtenção de suas finalidades e no fortalecimento da entidade.

Art. 12º - A assembléia geral e o órgão máximo de decisão do Instituto, é constituída por todos os sócios em pleno exercício de seus direitos e será coordenada por um membro da direção e, na ausência destes, por um dos sócios presentes eleito para essa finalidade.

Parágrafo Primeiro: A Assembléia geral reunira em sessão ordinária a cada ano, e em sessão extraordinária quando convocada pela direção, pelo conselho fiscal ou mediante requerimento de ⅓ (um terço) de seus associados, em pleno gozo de seus direitos sociais, após solicitação não atendida a direção.

Parágrafo Segundo: A convocação da Assembléia Geral será através de edital afixado, com 15 (quinze) dias de antecedência, na sede do Instituto e enviado por correio a todos os associados.

Parágrafo Terceiro: A Assembléia Geral se reunirá em primeira convocação com a presença de ⅔ (dois terços) dos associados em dia com seus direitos sociais e em segunda convocação com a presença de metade mais um dos associados, 01 (uma) hora após a primeira, e em terceira convocação com presença mínima de 10 (dez) associados, após mesmo período de espera.

Parágrafo Quarto: A Assembléia Geral Ordinária se reunirá a cada 3 (três) anos para eleger a direção e a cada ano para eleger o Conselho Fiscal e a análise de prestação de contas e Extraordinariamente sempre que houver necessidade.

At. 13º - Compete à Assembléia Geral

I - Eleger a direção ou destituir qualquer membro.

II - Eleger o Conselho Fiscal.

III - Decidir sobre programas de trabalho e respectivos orçamentos.

IV - Fixar a contribuição anual dos associados.

V - Aprovar o balanço e as contas do exercício anterior e destinar as sobras ou perdas.

VI - Reformular o Estatuto Mediante aprovação de dois terços dos Associados presentes

VII - Quaisquer assuntos de interesse social

VIII - As deliberações da Assembléia Geral, dar-se-á mediante aprovação da maioria simples dos presentes.

Capítulo V - Da Direção

Art. 14º - A direção do INSTITUTO PRESERVAR é composta por três sócios que distribuirão entre si a função de Coordenador-Geral, tesoureiro e secretário, mais um suplente, eleitos pela assembléia geral, dentre os sócios em pleno gozo de seus direitos, com mandatos de três anos, podendo ser reeleitos por um novo período no mesmo cargo ou em cargos diferentes.

Parágrafo Primeiro: A Direção se reunira sempre que for necessário.

Parágrafo Segundo: O suplente poderá acompanhar as reuniões da direção e se tornará efetivo diante do afastamento de qualquer um dos membros da direção, que distribuirão novamente entre si as funções.

Art. 15º - Para implementar as duas decisões a Direção constituirá uma Secretaria Executiva e poderá nomear um titular, o tesoureiro, que participará de suas reuniões sempre que convidado, sem direito a voto, podendo a qualquer momento ser destituído.

Art. 16º - Compete à Direção:

I - Cumprir e fazer cumprir o presente estatuto e outros regulamentos aprovados, garantindo a consecução dos objetivos do Instituto.

II - Acolher quaisquer reclamações dos associados.

III - Propor e coordenar a executar o plano de trabalho do Instituto.

IV - Preparar e encaminhar relatório anual para a assembleia.

V - Aprovar o quadro administrativo do Instituto.

VI - Decidir sobre os casos omissos nesse estatuto.

VII - Preparar regulamentos e normas internas submetendo-as à assembléia.

VIII - Realizar convênios, contratação de empréstimos, bem como receber doações.

IX - Alienar bens do Instituto.

X - Decidir sobre convênios, contratação de empréstimos, bem como receber doações.

IX - Alienar bens do Instituto.

X - Decidir sobre convênios, acordos, parcerias, bem como sobre investimentos.

Art. 17º - Compete ao Coordenador-Geral

I - Representar o Instituto ativa e passivamente em juízo ou fora dele.

II - Coordenar a assembléia geral.

III - Assinar em conjunto com o Secretário Executivo a movimentação bancária.

Art. 18º - Compete ao secretário:

I - Organizar os livros e documentos e responsabilizar-se pelos assuntos da secretaria do Instituto.

II - Garantir a elaboração das Atas das Assembléias e da Direção do Instituto.

Art. 19º - Compete ao tesoureiro:

I - Zelar pela manutenção e conservação do patrimônio.

II - Responder pela guarda de valores e títulos do Instituto.

III - Assinar os balancetes e relatórios financeiros, conjuntamente com o Secretário Executivo.

IV - Zelar pela ordem financeira e contábil do Instituto.

Art. 20º - Compete ao Secretário Executivo:

I - Encaminhar as decisões tomadas pela Direção

II - Movimentar as contas bancárias conjuntamente com o Coordenador-Geral.

III - Apresentar relatórios sistemáticos da situação administrativa e financeira do Instituto.

IV - Representar a entidade perante o Ministério do Trabalho, da Previdência Social, Receita Federal, Receita Estadual e Prefeituras.

Capítulo VI - Do Conselho Fiscal

Art. 21º - O conselho fiscal é composto por 03 (três) membros titulares e 03 (três) suplentes, com ordem de suplência, eleitos em assembléia geral, dentre os sócios em pleno gozo de seus direitos, com mandato de 01 (um) ano.

Parágrafo Primeiro: Em cada eleição é obrigatório à renovação de dois terços de seus componentes.

Parágrafo Segundo: O Conselho Fiscal se reunirá, pelo menos uma vez por ano, para o desempenho de suas atividades e, sempre que desejar supervisionar o andamento do Instituto.

Art. 22º - Compete ao Conselho Fiscal:

I - Fiscalizar todo o Movimento financeiro e do patrimônio.

II - Verificar os Documentos e livros contábeis e fiscais exigidos pela fiscalização.

III - Fiscalizar atos da direção e preparar um relatório anual para a Assembléia Geral.

IV - Em caso de irregularidade ou por motivos graves poderá convocar uma Assembléia Geral Extraordinária.

V - Aprovar as contas no final de cada gestão, para a devida apreciação da Assembléia Geral.

Parágrafo Único: A contabilidade do Instituto Preservar obedecerá às disposições legais ou normativas vigentes e tanto ela como os demais registros obrigatórios deverão ser mantidos em perfeita ordem e em dia. Para efeito da escrituração contábil da organização todos os documentos devem seguir as Normas Brasileiras de Contabilidade estabelecidas pela legislação vigente e pelo Conselho Federal de Contabilidade.

Capítulo VII - Das Eleições da Direção e do Conselho Fiscal

Art. 23º - As eleições serão realizadas a cada 03 (três) anos para a Direção e a cada ano para o Conselho Fiscal, na assembléia geral ordinária, levando em conta:

Parágrafo Primeiro: A eleição da Direção e do Conselho Fiscal, quando coincidirem, serão eleições separadas.

Parágrafo Segundo: Os associados presentes na Assembléia deverão indicar os candidatos e, se possível, construir um consenso.

Parágrafo Terceiro: A eleição será realizada por sufrágio direto e secreto, não sendo permitido o voto por procuração.

Parágrafo Quarto: A votação dos membros da Direção será um de cada vez e será considerado eleito o candidato que obtiver metade mais um dos votos dos sócios aptos a votar.

Parágrafo Quinto: Caso nenhum dos candidatos votados obtenha metade mais um dos votos, será feita nova eleição onde concorrerão somente dois candidatos mais votados no primeiro Escrutino.

Parágrafo Sexto: A votação do Conselho Fiscal seguirá o mesmo procedimento dos membros da Direção.

Parágrafo Sétimo: Caso a Assembléia chegar a um consenso sobre os membros da Direção ou do Conselho Titular, sejam titulares ou suplentes, a votação poderá ser do conjunto.

Parágrafo Oitavo: Todo o processo eleitoral desde a indicação de candidatos até a contagem dos votos e respectiva publicação, deverá ser presidida pelo coordenador da Assembléia.

Capítulo VIII - Do Patrimônio

Art. 24º - Os recursos do Instituto constituídos de:

I - Contribuições pagas pelos sócios.

II - Doações e subvenções Públicas e privadas

III - Resultado de iniciativas econômicas ou produtivas

IV - Outras receitas.

Art. 25º - O patrimônio do Instituto é constituído de valores e bens de qualquer natureza recebidos ou por ela adquiridos.

Art. 26º - Os sócios não respondem subsidiariamente pelas obrigações assumidas pela associação.

Art. 27º - As dívidas da associação são aquelas assumidas pela direção.

Art. 28º - Cada sócio indenizará a associação dos prejuízos que está sofrer por culpa dele.

Art. 29º - O sócio investido na administração responderá pessoalmente por todos os atos que praticar fora dos limites patrimoniais da entidade.

Art. 30º - Em caso de extinção da associação, seu patrimônio será doado, a critério da assembléia geral, a outras entidades de agricultores que tiverem objetivos semelhantes.

Parágrafo único: Extinção da associação se dará por decisão da Assembléia Geral extraordinário especialmente convocada para esse fim, e mediante aprovação de ⅔ (dois terços) dos associados.

Capítulo IX - Disposições Gerais e Transitórias

Art. 31º - Os casos omissos deste estatuto serão resolvidos pela direção, levando em conta a lei e poderão ser contestados na Assembléia,

Art. 32º - O presente estatuto somente poderá ser modificados em assembléia geral extraordinária, especialmente convocada para esse fim e mediante aprovação de pelo menos ⅔ (dois terços) dos sócios presentes.

Art. 33º - Este estatuto entra em vigor imediatamente na data de sua aprovação.

Aprovadas as alterações na assembléia realizada em 29 de maio de 2026.

MARINA B. DERAMAM
OAB/RS Nº 80.479

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
COMARCA DE VIAMÃO
Rua Isabel Bastos, 253 - Centro CEP 94410250
Serviços de Registro de Títulos e Documentos e Pessoa Jurídica
Dr. Guilherme Pinho Machado - Oficial

Serviço Notarial e Registral - Viamão - RS

CERTIDÃO

Certifico que foi averbada a Ata de Assembléia Geral Ordinária de 29/05/2026 do Instituto Preservar, conforme documento:

ATA DE ASSEMBLEIA GERAL ORDINÁRIA

INSTITUTO PRESERVAR.

CNPJ: 05.858.859/0001-50

Ao vigésimo nono dia do mês de maio do ano de dois mil e vinte e seis, às 9 horas e 00 minutos, em segunda convocação, reuniram-se na sede do Instituto Preservar, sito a Ponta do Aterro RS 040, KM 20, s/n, Assentamento Sepé, interior do Município de Viamão/RS, CEP 94400-992, estando presentes representantes de metade mais umas das/os associadas/os, conforme assinatura no livro de presenças, constituindo o quórum legal e estatutário para a deliberação em segunda chamada. Após a constituição da mesa presidida pelo senhor **Gilson Gilmar Schneider** e por mim, **Mauricio Roman**, acompanhados da advogada do Instituto Dra. Marina Ramos Dermmam, iniciou-se os trabalhos com a leitura do edital de convocação, que continha a seguinte ordem do dia para a Assembleia Geral Ordinária do INSTITUTO PRESERVAR: **1º)** Prestação de Contas dos Exercícios de segundo semestre de 2023, 2024, 2025 e do primeiro semestre de 2026; **2º)** Eleição do Conselho Diretor; **3º)** Eleição do Conselho Fiscal; **4º)** Aprovação do plano de ação para o próximo período de atividades e assuntos gerais. Aprovada a pauta e não havendo manifestação, deu-se continuidade a assembleia **iniciando pelo primeiro ponto**, o contador da entidade apresentou as contas dos exercícios anteriores, seguido pela leitura do parecer do Conselho Fiscal, que recomendou a aprovação. Antes da deliberação, foi justificado que, em razão de dificuldades práticas que impediram a convocação de assembleias anuais nos exercícios anteriores, especialmente em razão das enchentes em maio de 2024, e risco de novos episódios climáticos em 2025, e para garantir a observância ao princípio da continuidade administrativa, evitando que a associação ficasse sem a devida fiscalização, o mesmo Conselho Fiscal eleito no último pleito teve seu mandato estendido de fato para exercer a função. A presente assembleia serve, portanto, para regularizar a situação e ratificar os atos de fiscalização praticados. Após os esclarecimentos, as contas e o balanço dos exercícios do segundo semestre de 2023, 2024, 2025 e do primeiro semestre de 2026 foram submetidos à votação e aprovados por unanimidade.

Passando ao segundo ponto, procedeu-se à eleição do Conselho Diretor, sendo apresentada a chapa e em seguida realizada a votação sendo eleitos com mandato de três anos, o conselho Diretor ficou assim composto: **01) Coordenador Geral: Mauricio Roman**, brasileiro, casado, agricultor, residente na Rua: Passo do Caí n. 135, casa, no Município de Nova Santa

continua na próxima folha

Serviço Notarial e Registral - Viamão - RS

continuação da folha anterior

Rita /RS, Cep: 92.480-00, portador da carteira 1048263469 SSP/RS, CPF 928.839.230-00, com correio eletrônico: roman.dh21@gmail.com ; **02) Tesoureiro: Sérgio Reis Marques**, brasileiro, casado, agricultor, portador da carteira de identidade 4042470445 SSJ/RS, CPF 903.124.810-04, residente e domiciliada no assentamento Tarumã, interior município de Jóia/RS, CEP 92180-000, não possui correio eletrônico; **03) Secretária Silvia Reis Marques**, brasileira, solteira, agricultora, portadora da carteira de identidade 2061753766 SJS/RS, CPF 007.062.610-38, residente e domiciliada no assentamento Everton Ribeiro, Rincão, município de Bossoroca-RS, CEP 97850-000, correio eletrônico: silvia.marquesss78@gmail.com; e como suplente **Suplente: Álvaro Delatorre**, brasileiro, casado, agrônomo, portador da carteira de identidade RG n. 1012695051 SJS/RS e CPF n. 397.712.700-44, residente e domiciliado no município de Porto Alegre/RS, CEP 91260-010, e-mail: torre_alvaro@yahoo.com.br;

No terceiro ponto, realizou-se a eleição para o Conselho Fiscal. realizada a votação foram eleitos para o Conselho Fiscal como titulares: **1) Seleni de Fátima de Lima**, brasileira, solteira, agricultora, portadora da carteira de identidade 7073847845 SJS/RS e CPF 932784200-63, residente e domiciliada no Assentamento Filhos de Sepé, interior do município de Viamão/RS, CEP 94440-000, não possui correio eletrônico; **02) Gilson Gilmar Schneider**, brasileiro, solteiro, agricultor, portador da carteira de identidade sob RG 9801695-3 SSP/PR; CPF 061.290.289-70, residente e domiciliado na R. Ayrton Senna, nº 2105, Nova Santa Rita-RS, CEP 92480-000, e-mail: gilsongilmarschneider@yahoo.com.br; **03)Tainara Fernandes Carvalho**, brasileira, solteira, agricultora, portadora da carteira de identidade sob RG 1105536121, CPF n.013.353.740-43, residente e domiciliada no assentamento Itaguaçu Batovi, município de São Gabriel, CEP 97300-000, e-mail: carvalhotaimst@gmail.com ; **e como suplentes: 01) Camila Celeste Santos dos Santos,** brasileira, solteira, assistente social, portadora da carteira de identidade RG n. 8098077954 SSP/RS, CPF 020.149.280-61, residente e domiciliada no Assentamento Águas Claras, no interior do município de Viamão/RS, não possui correio eletrônico; **02) Marli Zimmermann de Moraes**, brasileira, casada, pedagoga, residente e domiciliada no assentamento Águas Claras, interior do município de Viamão/RS, portadora da carteira identidade RG n. 4053603901 SJTC/RS, CPF 575.643.100-49, não possui correio eletrônico; **03) Alcinda Soares Ribeiro**, brasileira, casada, agricultora, residente e domiciliada no Assentamento Lagoa do Junco s/n, interior do município de Tapes/RS, portadora da carteira de identidade RG n. 8016504147 S/RS e CPF 9387.113.220-87, não possui correio eletrônico. Ato contínuo, os eleitos foram empossados e declararam, sob as penas da lei e em conformidade

continua na próxima folha

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
COMARCA DE VIAMÃO
Rua Isabel Bastos, 253 - Centro CEP 94410250
Serviços de Registro de Títulos e Documentos e Pessoa Jurídica
Dr. Guilherme Pinho Machado - Oficial

Serviço Notarial e Registral - Viamão - RS -

continuação da folha anterior

com o § 1º do art. 1.011 do Código Civil, que não estão impedidos de exercer a administração da associação, por lei especial ou em virtude de condenação criminal, ou por se encontrarem sob os efeitos dela, a pena que vede, ainda que temporariamente, o acesso a cargos públicos: ou por crime falimentar, de prevaricação ou suborno, concussão peculato, ou contra a economia popular, contra o sistema financeiro nacional, contra normas de defesa da concorrência, contra as relações de consumo, fé pública, ou a propriedade.

No terceiro ponto, referente a outros assuntos, foi organizado e aprovado o plano de ação para o próximo período e gestão.

Em seguida, foi perguntado aos presentes se havia mais algum assunto a tratar e como nada foi apresentado suspendeu-se a assembleia para que fosse redigida a presente ata. Após o retorno, foi lida e achada conforme e foi assinada por mim, sr. **Gilson Gilmar Schneider,** que escriturei a presente ata e pelo Sr. Maurício Roman, que presidiu a assembleia. Sendo esta a cópia fiel da ata transcrita no livro da Associação.

Viamão/RS, 29 de maio de 2026.

Gilson Gilmar Schneider
Secretário de Mesa

Mauricio Roman
Mauricio Roman
Presidente de Mesa

Dra. Marina Ramos Dermmam
OAB/RS nº 80.479

CERTIFICO que a presente certidão, com 3 páginas, numeradas e rubricadas, é cópia fiel do documento registrado nesta Serventia em 30/06/2026, no Livro A- 34, nas folhas 154, sob o número de ordem AV- 10 771. O referido é verdade e dou fé. Viamão/RS, 30/06/2026.

Jader Luiz Lubas dos Santos
Escrevente

SERVIÇOS DE REGISTROS DE IMÓVEIS, ESPECIAIS E TAB. DE PROTESTOS
Jader Luiz Lubas dos Santos
Escrevente Autorizado

Emolumentos:
Total: R$ 61,00 + R$ 12,10 = R$ 73,10
Certidão PJ (03 páginas): R$ 40,80 (0738.04.1900004.15453 = R$ 5,50)
Busca: R$ 12,90 (0738.03.1900004.05422 = R$ 4,40)
Processamento eletrônico: R$ 7,30 (0738.01.1900004.18622 = R$ 2,20)

Rua Isabel Bastos, 253 - Sala 201 - Centro - Viamão/RS – CEP 94410-250 – Fone (51) 3446.8561 – E-mail: ted cartorioviamao.com.br

A consulta estará disponível em até 24h
no site do Tribunal de Justiça do RS
http://go.tjrs.jus.br/selodigital/consulta
Chave de autenticidade para consulta
098897 54 2026 00000696 25

PGR-00076976/2025

MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL
PROCURADORIA GERAL DA REPÚBLICA
SECRETARIA DE PERÍCIA, PESQUISA E ANÁLISE
CENTRO NACIONAL DE PERÍCIA

LAUDO TÉCNICO Nº 225/2025 – SPPEA

REFERÊNCIA	PA - OUT - 1.29.000.000774/2024-42
UNIDADE SOLICITANTE	PRM Caxias do Sul/RS
AUTORIDADE REQUERENTE	Procuradora da República Flávia Rigo Nóbrega
EMENTA	Barragens. Avaliação da segurança estrutural das barragens das UHEs 14 de Julho, Monte Claro e Castro Alves e análise sobre pertinência de revisão da mancha de inundação e do cronograma de simulados de mesa e de evacuação. Cotiporã/RS, Veranópolis/RS e Nova Roma do Sul/RS. Energia. CERAN. Segurança de barragens.
TEMÁTICA	Meio ambiente e patrimônio cultural
SOLICITAÇÃO DE PERÍCIA	3971/2024
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Feição considerada: (x) pontual ( ) linear ( ) poligonal Lat/Long dec.: -29.065045°, -51.674662° -29.030838°, -51.521137° -29.005551°, -51.384258°

I INTRODUÇÃO

1. Trata-se de atendimento à Solicitação de Perícia 3971/2024, por meio da qual a Exma. procuradora da República Flávia Rigo Nóbrega requer avaliação da segurança estrutural das barragens das UHEs 14 de Julho, Monte Claro e Castro Alves, mediante inspeção *in loco* e análise documental. Também foi solicitada análise quanto à pertinência de que seja revisada as manchas de inundação dos barramentos, em vista dos eventos climáticos extremos que têm assolado a região, e de que seja revisto o cronograma de simulados de mesa e de evacuação,

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

exigindo-se ajustes nos Planos de Segurança das Barragens (PSB) e nos correspondentes Planos de Ação de Emergência (PAE).

II ANÁLISE

2. A análise apresentada neste laudo técnico diz respeito à área de Engenharia Civil e contempla o exame da documentação disponibilizada e os dados obtidos durante a perícia de campo, não sendo consideradas outras áreas de conhecimento.

II.I SEGURANÇA ESTRUTURAL DAS BARRAGENS

II.I.I PERÍCIA DE CAMPO

3. Conforme planejado, as vistorias ocorreram nos dias 4, 5 e 6 de fevereiro de 2025, iniciando-se pela inspeção na barragem da UHE 14 de Julho no primeiro dia, seguindo pelas vistorias nas barragens das UHEs Monte Claro e Castro Alves nos dois dias seguintes, respectivamente.

4. Além dos peritos signatários, participaram das três vistorias os engenheiros designados pela Ceran: André Akashi, Felipe Alves e Luis Fernando Melegari.

5. No primeiro dia das vistorias, foi realizada uma apresentação pelos prepostos da Ceran com o objetivo de fornecer informações sobre as três barragens e também para contextualizar os eventos críticos recentes, especialmente o de maio de 2024, que causou danos significativos aos acessos e instalações da Ceran, destacando-se a inundação da casa de força da UHE Monte Claro e o rompimento parcial da barragem da UHE 14 de Julho. A mencionada apresentação foi disponibilizada pela Ceran e encontra-se no Anexo 1 deste laudo técnico.

6. Considerando que a SPPEA não disponibiliza recursos para realização de ensaios tecnológicos e laboratoriais, a análise *in loco* da segurança estrutural das barragens foi feita por meio da avaliação geral das estruturas de concreto e dos reservatórios e também por meio da verificação de ocorrências de manifestações patológicas nos elementos construtivos das

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

represas, além da verificação da existência e funcionamento dos equipamentos de monitoramento (instrumentos[1]) dos barramentos.

II.I.I.I BARRAGEM DA UHE 14 DE JULHO

7. Segundo informações contidas em documentação fornecida pela Ceran, a barragem da UHE 14 de Julho foi construída por meio da técnica de Concreto Compactado a Rolo (CCR)[2], possui comprimento total de 362 m, altura de 33 m e comprimento de soleira vertente de 250 m. Além disso conta com 2 comportas de segmento[3] e com 57 instrumentos, dos quais 2 são automatizados, havendo previsão de aumento desse número para se chegar a um total de 7 instrumentos automatizados.

(a) Histórico do rompimento parcial e das ações de recuperação

8. As chuvas intensas que atingiram o estado do Rio Grande do Sul no início de maio de 2024 alcançaram níveis proporcionais àquelas ocorridas em setembro e novembro de 2023. No entanto, pelas características das inundações observadas, causou mais devastação do que as anteriores.

9. A região da serra nordeste do estado, principalmente as áreas marginais aos vales do Rio das Antas e do Rio Taquari sofreu mudanças no visual das encostas, nas construções às margens dos cursos d'água, nas rodovias, tanto federais, como estaduais e vicinais, no leito dos rios.

---

[1] Os instrumentos de barragens são dispositivos utilizados para monitorar o desempenho e a segurança da estrutura ao longo do tempo. Eles permitem detectar movimentações, infiltrações, variações de pressão e outros fatores que possam comprometer a integridade e a segurança das barragens.

[2] O Concreto Compactado a Rolo (CCR) é um tipo de concreto de baixo teor de cimento e consistência seca, aplicado e compactado por rolos compressores. Ele é amplamente utilizado na construção de barragens devido à sua rapidez de execução, economia e durabilidade. Esse material combina características do concreto convencional e do solo compactado, permitindo a construção de barragens com menores custos e maior eficiência em comparação com métodos tradicionais.

[3] As comportas de segmento são dispositivos utilizados em barragens para controlar o fluxo de água em vertedouros, tomadas d'água e outras estruturas hidráulicas. Elas possuem um formato curvo, semelhante a um segmento de círculo, e são articuladas em eixos laterais, permitindo um movimento rotacional para abrir ou fechar a passagem da água. Essas comportas são projetadas para suportar grandes pressões e garantir um controle eficiente do nível do reservatório. Entre suas vantagens estão a facilidade de operação, a redução de esforços estruturais e a boa vedação, o que minimiza perdas de água.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

10. As barragens situadas no Rio das Antas, fortemente atingidas pelo volume excepcional de água, foram aquelas pertencentes às usinas da Ceran: UHE Castro Alves, UHE Monte Claro e UHE 14 de Julho.

11. Na apresentação realizada no primeiro dia das vistorias, os prepostos da Ceran detalharam os eventos e motivos que levaram ao rompimento parcial da barragem da UHE 14 de julho. Em resumo tem-se que o rompimento parcial da barragem ocorreu pela impossibilidade de se realizar a abertura total das comportas durante o período mais crítico da cheia de maio de 2024, o que elevou o nível d'água de montante para acima do máximo de projeto (máximo *maximorum*[4]), gerando forças/pressões não previstas e, consequentemente, o rompimento parcial da barragem.

12. De acordo com a Ceran, no dia 01/05/2024, ocorreu a perda de alimentação/energia, posteriormente confirmada como sendo causada pela queda de uma das torres da linha de transmissão da UHE 14 de Julho. Assim, os comandos de abertura das comportas do vertedouro da barragem da UHE 14 de Julho passaram a não responder. Diante da impossibilidade de abrir as comportas remotamente, uma equipe de manutenção foi enviada a pé, mas não conseguiu acessar a barragem da UHE 14 de Julho, em ambas as margens, devido a deslizamentos de taludes, o que impediu o acesso à sala do vertedouro para realizar a abertura manual das comportas.

13. Na sequência, ainda segundo a Ceran, foram iniciadas conversas com as Defesas Civis e órgãos governamentais para disponibilização de helicóptero para acessar da sala do vertedouro da UHE 14 de Julho e realizar a abertura local das comportas. Contudo devido às condições meteorológicas adversas, nenhuma aeronave decolava na região, permanecendo assim até a ocorrência do rompimento parcial do trecho superior da soleira vertente da barragem, às 13h23 do dia 02/05/2024. Por fim, somente em 03/05/2024, a equipe da Ceran conseguiu acessar a sala do vertedouro da barragem da UHE 14 de Julho e iniciar a abertura das comportas.

[4] O termo máximo *maximorum* é uma expressão em latim que significa "o maior dos maiores". Ele é usado para enfatizar algo que está no mais alto nível de grandeza, superior a todos os outros da mesma categoria. Essa expressão pode ser aplicada em diversos contextos, como filosofia, matemática, retórica e até na classificação de recordes ou líderes. Em estatística, por exemplo, pode se referir ao maior valor entre os valores máximos de diferentes conjuntos. No uso cotidiano, pode ser empregado para exagerar ou enaltecer algo de forma enfática.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

14. Maiores detalhes sobre o andamento dos eventos que levaram ao rompimento parcial podem ser vistos na apresentação da Ceran, que se encontram no Anexo 1 desta peça técnica.

15. A Figura 1, a seguir, mostra um panorama geral do estado da barragem após o rompimento parcial.



Figura 1 – Barragem da UHE 14 de Julho após o rompimento parcial.

Fonte: Ceran.

16. Após o nível do Rio das Antas voltar à normalidade, a Ceran mobilizou grupo de trabalho composto por técnicos próprios, projetistas e consultoria em tecnologia do concreto, que inspecionou e atestou as condições de segurança e estabilidade da estrutura remanescente da barragem.

17. A inspeção comprovou o rompimento parcial dos Blocos 7 ao 16 da barragem da UHE 14 de Julho, constatando-se, visualmente, condições normais para o restante da estrutura.

18. Foram realizados ensaios investigativos de campo e testes e ensaios de laboratório de modo a obter-se dados necessários e suficientes para a elaboração de projeto de recuperação da área afetada.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

19. Destacam-se, entre os procedimentos investigativos, a utilização de ensaio ultrassônico[5], levantamentos com boroscópio[6], ensaios de laboratório, perfurações e extração de testemunhos.

20. Os corpos de prova extraídos nas regiões afetadas e adjacentes foram submetidos aos seguintes ensaios de laboratório:

20.1. Ruptura à compressão axial - NBR 5739

20.2. Absorção de água, Índice de vazios e massa específica - NBR 9778

20.3. Penetração de água sob pressão - NBR 10787

20.4. Módulo de deformação - NBR 8522

20.5. Ultrassom - NBR 8802

21. A análise do ensaio de campo foi complementada com a determinação do CQD – *Concrete Quality Designation* (Índice de Qualidade do Concreto)[7].

22. Os resultados colhidos em campo e obtidos em laboratório permitiram a elaboração do projeto de recuperação das estruturas, mantendo as características do projeto original e sua respectiva execução.

> Com base nas informações de CQD e demais ensaios e inspeções de campo, decidiu-se pela não demolição do bloco 17, apenas orientando os trabalhos para remoção dos trechos de concreto de CQD inferior a 77%, optando-se pelo reforço estrutural do bloco.

---

5 Ensaio ultrassônico é um método de ensaio não destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de um componente de concreto, e suas principais aplicações são: verificação da homogeneidade do concreto; detecção de falhas internas no concreto, profundidade de fissuras e outras imperfeições; monitoramento das variações do concreto, ao longo do tempo, devido à agressividade do meio ambiente; avaliação do padrão de qualidade do concreto com base no comprimento de onda m/s.

6 Ensaio de boroscopia é um tipo de ensaio não destrutivo, ou seja, não causa danos a estrutura das peças analisadas; o instrumento é muito preciso e consegue atingir áreas muito difíceis de serem acessados, devido à microcâmera instalada em sua extremidade, o que torna a análise ainda mais eficiente, devido à alta exatidão na detecção de descontinuidades.

7 Baseado na publicação “Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity”, (François Saint-Pierrea, Alain Philibertb, Bernard Girouxc, Patrice Rivardd).

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

23. A reconstrução dos blocos de concreto da barragem seguiu em duas etapas, à montante e à jusante, conforme detalhado a seguir.

23.1. Etapa 1 – concretagem da estrutura em etapas de modo a manter as características do projeto original, tratamento e nivelamento da estrutura remanescente, seguido da reconstrução dos Blocos 7 a 16 do vertedouro e dos reparos no poço de acesso do Bloco 17. A reconstrução da estrutura foi realizada em concreto convencional, com a face hidráulica armada. Permitiu a antecipação do enchimento do reservatório.

23.2. Etapa 2 – concretagem a jusante, com a finalização do acabamento da soleira e degraus, garantindo a integridade e a funcionalidade da estrutura, tendo por base a sua execução com forma deslizante.

24. Em resumo, as ações realizadas pela Ceran para a recuperação dos danos na barragem da UHE 14 de Julho e região são as listadas a seguir.

24.1. Liberação dos acessos à barragem e à casa de força;

24.2. Realização de Inspeção de Segurança Especial – que subsidiou a mudança do status da barragem Nível de Emergência para Nível de Alerta – e inspeção com consultoria e projetista, ambas em 09/05/2024;

24.3. Drenagem e limpeza da galeria da barragem;

24.4. Ensaios tecnológicos na estrutura remanescente da barragem (ultrassom no concreto, ensaios de perda d'água, retirada de testemunhos para ensaios de ruptura à compressão axial, dentre outros);

24.5. Elaboração de projeto de recuperação estrutural da barragem mantendo as características do projeto original;

24.6. Retomada da leitura da instrumentação manual e instalação de automação adicional de instrumentos na barragem;

24.7. Reativação da linha de transmissão;

24.8. Recuperação do acesso à ponte de serviço da barragem;

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

24.9. Recuperação das cabeceiras da ponte de serviço, normalizado o acesso à margem esquerda e comportas do vertedouro;

24.10. Novo acesso na margem direito foi executado em cota mais elevada, permitindo maior proteção em período de chuvas;

24.11. Realização de acessos à montante e à jusante da barragem;

24.12. Remoção parcial de elementos danificados da barragem;

24.13. Início das obras para recuperação estrutural da barragem;

24.14. Mapeamento com drone para monitoramento do comportamento da estrutura da barragem;

24.15. Conclusão da recuperação da face de montante da barragem, possibilitando a normalização do nível operacional do reservatório.

25. Ao fim das vistorias, foram solicitados diversos documentos à Ceran, dentre os quais encontra-se o Relatório de Recuperação da barragem da UHE 14 de Julho, que pode ser consultado, para obtenção de maiores detalhes, no Anexo 2 deste laudo técnico.

(b) Vistoria

26. Durante a vistoria realizada pelos peritos signatários na barragem da UHE 14 de Julho, constatou-se que a recuperação estrutural da face de montante da barragem foi concluída, permitindo a normalização do nível operacional do reservatório. Além disso, verificou-se a reconstituição dos diversos acessos, incluindo o acesso à ponte de serviço da barragem, que foi utilizada durante a inspeção para alcançar a margem esquerda.

27. Conforme pode ser visto em fotos do Relatório Fotográfico deste laudo técnico – Apêndice A –, atualmente a obra de recuperação estrutural da barragem da UHE 14 de Julho se encontra em fase de refazimento da face jusante da barragem, corroborando as informações prestadas pela Ceran.

28. Durante a apresentação da Ceran no início dos trabalhos, foi informado que durante o evento crítico de maio de 2024, que levou ao rompimento parcial da barragem, um

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

dos blocos próximos à ombreira direita da barragem – o Bloco 17 – apresentou uma pequena movimentação. Assim, os estudos que subsidiaram a elaboração do projeto de recuperação estrutural da barragem contemplaram o reforço desse elemento e, dentre as medidas sugeridas, há a previsão de inclusão de um contraforte[8].

29. Dessarte, também foi possível verificar, durante a inspeção, a execução dos trabalhos de reforço estrutural no Bloco 17, incluindo a preparação para a construção do mencionado contraforte, conforme pode ser visto em fotos do Relatório Fotográfico deste laudo técnico – Apêndice A.

30. Com relação à vistoria na galeria da barragem, foi possível constatar a existência dos instrumentos dos tipos pêndulo direto[9], medidor triortogonal de junta[10], piezômetro de fundação[11], extensômetro de haste[12], medidor de vazão[13] e termômetro[14], sendo 2 dos instrumentos automatizados, todos em bom estado de conservação e operacionais, em consonância com as informações prestadas pela Ceran. Alguns exemplos foram apresentados em fotos do Relatório Fotográfico deste laudo técnico – Apêndice A.

31. Também foi possível visualizar diversos pontos onde foram realizados ensaios tecnológicos (ultrassom no concreto e retirada de testemunhos) na estrutura remanescente da

---

8 Contraforte é um elemento estrutural utilizado para reforçar paredes, muros ou outros elementos robustos de concreto armado, aumentando sua resistência contra empuxos laterais. Em geral trata-se de uma espécie de pilar ou nervura disposto perpendicularmente à estrutura principal, ajudando a distribuir cargas e prevenir deformações excessivas.

9 Instrumento utilizado no monitoramento de barragens para medir deslocamentos horizontais da estrutura. Consiste em um fio suspenso em um ponto fixo no alto da barragem, mergulhado em um reservatório de líquido na base. As variações na posição do fio indicam deslocamentos da barragem ao longo do tempo, auxiliando na detecção de deformações.

10 Instrumento utilizado no monitoramento de barragens para medir deslocamentos relativos entre blocos de concreto em três direções ortogonais (longitudinal, transversal e vertical). Ele permite detectar aberturas, fechamentos ou deslocamentos nas juntas da estrutura, auxiliando na avaliação da integridade e estabilidade da barragem.

11 Instrumento utilizado no monitoramento de barragens para medir a pressão da água nos poros do solo ou do maciço rochoso na fundação da estrutura. Ele auxilia na avaliação da estabilidade da barragem, detectando variações em pressões que podem indicar risco de instabilidade geotécnica.

12 Instrumento utilizado no monitoramento de barragens para medir deslocamentos internos em diferentes profundidades. Consiste em uma haste ancorada em um ponto fixo no interior da estrutura ou no solo, permitindo detectar movimentações diferenciais ao longo do tempo.

13 Instrumento utilizado no monitoramento de barragens para medir a quantidade de água que escoa através da estrutura. Ele auxilia na detecção de vazamentos, no controle do fluxo de água e na avaliação da eficiência do sistema de drenagem.

14 Instrumento utilizado no monitoramento de barragens para medir a temperatura do concreto, da água ou do solo. As variações térmicas podem influenciar a dilatação dos materiais e a pressão da água nos poros, afetando a estabilidade da estrutura.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

barragem, conforme exemplos da Figura 2, a seguir, corroborando as informações fornecidas pela Ceran.



Figura 2 – Pontos de realização de ensaio de ultrassom no concreto (esquerda) e ponto de retirada de testemunho (direita).

32. De modo geral, considera-se que as medidas adotadas e em andamento por parte da Ceran são condizentes com a magnitude dos danos resultantes do evento climático extremo ocorrido em maio de 2024. Nesse contexto, a avaliação conduzida pelos peritos signatários, tanto por meio da inspeção *in loco* quanto pela análise dos documentos disponibilizados, indica que as ações implementadas são adequadas para restabelecer as condições geométricas originais da barragem. Ademais, observa-se um incremento na resistência global da estrutura, notadamente pelo reforço estrutural em execução no Bloco 17, conforme já explicado. Dessa forma, depreende-se que, com a conclusão de todas as etapas do processo de recuperação da barragem da UHE 14 de Julho, a segurança da represa será plenamente restabelecida.

II.I.I.II BARRAGEM DA UHE MONTE CLARO

33. Segundo informações contidas em documentação fornecida pela Ceran, a barragem da UHE Monte Claro foi construída por meio da técnica de Concreto Compactado a Rolo (CCR), possui comprimento total de 250 m, altura de 36 m e comprimento de soleira vertente de 180 m. Além disso conta com 2 comportas de segmento e com 41 instrumentos, dos quais 9 são automatizados.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

(a) Vistoria

34. No decorrer da inspeção técnica realizada na barragem da UHE Monte Claro, verificou-se que a estrutura apresentava bom estado de conservação, sem indícios de degradação, anomalias ou manifestações patológicas que possam sugerir comprometimento da sua estabilidade ou segurança estrutural.

35. Com efeito, foram observados indícios de realização de manutenções frequentes no corpo da barragem, conforme pode ser observado na Figura 3, a seguir, onde podem ser vistas marcas de reparos pontuais – polígonos em cor mais clara –, que denotam a realização de verificações constantes das avarias na barragem, com consequente recuperação estrutural das regiões danificadas.



Figura 3 – Marcas de reparos pontuais na superfície do concreto da barragem da UHE Monte Claro.

36. Com relação à vistoria na galeria da barragem, foi possível constatar a existência dos instrumentos dos tipos medidor triortogonal de junta, piezômetro de fundação, extensômetro de haste e medidor de vazão, sendo 9 dos instrumentos automatizados, todos em

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

bom estado de conservação e operacionais, em consonância com as informações prestadas pela Ceran. Alguns exemplos foram apresentados em fotos do Relatório Fotográfico deste laudo técnico – Apêndice A.

37. No momento da vistoria, uma das comportas encontrava-se em fase final de manutenção e recuperação, após ter sido danificada durante a cheia de setembro de 2023. Segundo informações fornecidas pela Ceran, a falha operacional de um dos cilindros hidráulicos [15] da comporta de segmento impediu sua abertura naquela ocasião. Como consequência, o aumento não programado do nível d'água a montante da barragem exerceu pressões superiores à capacidade da estrutura, resultando em danos à comporta.

38. Ainda de acordo com a Ceran, apesar da abertura limitada a apenas uma comporta, o nível d'água a montante permaneceu dentro do limite máximo de projeto (máximo *maximorum*), não sendo identificado nenhum comportamento anômalo que comprometesse a estabilidade da barragem.

39. De forma geral, a avaliação realizada pelos peritos signatários, com base nas constatações da inspeção *in loco*, indica que a barragem da UHE Monte Claro apresenta condições de segurança, sem evidências de riscos iminentes que comprometam sua estabilidade ou possam levar à sua ruptura.

II.I.I.III BARRAGEM DA UHE CASTRO ALVES

40. Segundo informações contidas em documentação fornecida pela Ceran, a barragem da UHE Castro Alves foi construída por meio da técnica de Concreto Compactado a Rolo (CCR), possui comprimento total de 341 m, altura de 48 m e comprimento de soleira vertente de 240 m. Além disso conta com 64 instrumentos, dos quais 9 são automatizados.

[15] Dispositivo mecânico que converte a energia hidráulica em movimento linear. É composto por um tubo cilíndrico, um êmbolo (ou pistão) e um fluido pressurizado, geralmente óleo. O fluido exerce pressão sobre o pistão, gerando força e deslocamento controlado. Em barragens, os cilindros hidráulicos são usados para acionar comportas, permitindo a regulação do fluxo de água.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

(a) Vistoria

41. No decorrer da inspeção técnica realizada na barragem da UHE Castro Alves, verificou-se que a estrutura apresentava bom estado de conservação, sem indícios de degradação, anomalias ou manifestações patológicas que possam sugerir comprometimento da sua estabilidade ou segurança estrutural.

42. Quanto à vistoria na galeria da barragem, foi possível constatar a existência dos instrumentos dos tipos pêndulo direto, medidor triortogonal de junta, piezômetro de fundação, extensômetro de haste, medidor de vazão e termômetros, sendo 9 dos instrumentos automatizados, todos em bom estado de conservação e operacionais, em consonância com as informações prestadas pela Ceran. Alguns exemplos foram apresentados em fotos do Relatório Fotográfico deste laudo técnico – Apêndice A.

43. De forma geral, a avaliação realizada pelos peritos signatários, com base nas constatações da inspeção *in loco*, indica que a barragem da UHE Castro Alves apresenta condições de segurança, sem evidências de riscos iminentes que comprometam sua estabilidade ou possam levar à sua ruptura.

II.I.II AÇÕES DA CERAN PARA APRIMORAMENTO DA OPERAÇÃO DAS COMPORTAS DAS BARRAGENS DAS UHES 14 DE JULHO, MONTE CLARO E CASTRO ALVES

44. De acordo com o exposto no item (a) da Seção II.I.I.I do presente laudo técnico, o rompimento parcial da barragem da UHE 14 de Julho decorreu da impossibilidade de abertura total das comportas durante o ápice da cheia de maio de 2024. Essa limitação resultou na elevação do nível d'água a montante para além do limite máximo de projeto (máximo *maximorum*), gerando pressões e forças hidrodinâmicas não previstas, culminando, assim, no rompimento parcial da barragem.

45. Diante do ocorrido, os peritos signatários questionaram a Ceran acerca das medidas preventivas adotadas para ampliar as possibilidades operacionais das comportas das barragens das três UHEs – sistemas redundantes –, de modo a assegurar que, mesmo em circunstâncias excepcionais, seja garantida a plena operação desses dispositivos, evitando que problemas semelhantes aconteçam no futuro.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

46. Em resposta, os prepostos da Ceran informaram que há um plano de melhorias para essa questão, cujo detalhamento é discriminado a seguir:

46.1. Instalação de geradores de emergência a diesel diretamente nas barragens. Anteriormente, as UHEs contavam com geradores a diesel que também atendiam às barragens; entretanto, cada barragem agora dispõe de um gerador exclusivo para alimentar os sistemas de controle das comportas e de drenagem das galerias;

46.2. Implementação de um sistema automatizado para a partida e interconexão dos geradores a diesel das barragens em caso de acionamento, cuja previsão de conclusão está estabelecida para maio de 2025;

46.3. Introdução de um sistema redundante de comunicação para a operação das comportas da barragem da UHE 14 de Julho. Atualmente, a comunicação ocorre via fibra óptica, e está em fase de projeto um sistema complementar de acionamento via rádio, que será instalado na margem oposta ao vertedouro. Esse sistema será utilizado exclusivamente em situações emergenciais, quando o acesso físico ao local não for viável. A implementação está prevista para maio de 2025.

47. Os peritos signatários consideram as medidas adotadas pela Ceran adequadas para mitigar riscos semelhantes no futuro. A instalação de geradores de emergência dedicados, a automação da partida e interconexão desses equipamentos e a implementação de um sistema redundante de comunicação para acionamento das comportas representam avanços na segurança operacional das barragens. Essas ações aumentam a confiabilidade dos mecanismos, assegurando que, mesmo em cenários excepcionais, a operação das comportas possa ser realizada de forma satisfatória.

II.I.III ESTUDOS DE ESTABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO DAS BARRAGENS

48. De acordo com a legislação e normas vigentes, as barragens brasileiras devem ser submetidas a Revisões Periódicas de Segurança (RPS). No caso das barragens das UHEs 14

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

de Julho, Monte Claro e Castro Alves, as revisões mais recentes foram realizadas em 2022, estando as próximas programadas para 2029, seguindo a periodicidade estabelecida de sete anos. Os relatórios técnicos das RPS das três barragens foram disponibilizados pela Ceran e podem ser consultados no Anexo 3 deste laudo técnico.

49. Dentre os diversos exames e verificações feitos, foram conduzidos estudos de estabilidade das estruturas de concreto das barragens. Esses estudos consideraram uma ampla gama de cenários, incluindo níveis máximos de projeto atualizados (máximo *maximorum*), eventos sísmicos e a inoperância dos sistemas de drenagem das barragens. Após detida análise, concluiu-se que os estudos possuem correto embasamento técnico e foram considerados adequados. As conclusões são reproduzidas a seguir.

49.1. Barragem da UHE 14 de Julho:

> Para a análise da estabilidade foram avaliados desenhos de arranjo geral e das estruturas de concreto, bem como relatórios de cálculo de estabilidade dessas estruturas, para os cálculos de estabilidade, aqui apresentados, foram utilizados os critérios da Eletrobrás.
>
> As estruturas da UHE 14 de Julho foram dimensionadas para os casos de carregamentos descritos na memória de cálculo de estabilidade dessa estrutura. Com o aumento das cheias de projeto que definem o nível máximo maximorum (TR 10.000), **a Soleira Vertente da UHE 14 de Julho ainda se mostra estável para todos os casos de carregamento, assim como a Ombreira Direita e Esquerda e o Vertedouro de Superfície Controlada**. [grifo nosso]

49.2. Barragem da UHE Monte Claro:

> Considerando as análises apresentadas neste relatório, as estruturas da Barragem de Soleira Vertente, Muro Esquerdo do Vertedouro e Vertedouro de Superfície Controlada **apresentam-se estáveis, atendendo aos critérios de projeto da Eletrobrás para todos os casos de carregamento analisados**. [grifo nosso]
>
> O vertedouro da UHE Monte Claro foi dimensionado para os casos de carregamentos descritos na memória de cálculo de estabilidade dessa estrutura. A altura, tamanho do reservatório e ocupação a jusante da barragem a colocam na condição de atender aos critérios determinados pela Eletrobrás (2003) para adoção de um tempo de recorrência de 1.000 anos para definir a cheia de projeto. As estruturas de concreto, mesmo com o aumento das cheias definidas na revisão da hidrologia atende aos critérios de estabilidade da Eletrobrás (2003) ainda se mantendo a recorrência de 10.000 anos de projeto.

49.3. Barragem da UHE Castro Alves:

> As estruturas da UHE Castro Alves foram dimensionadas para os casos de carregamentos descritos na memória de cálculo de estabilidade dessa estrutura. Com o aumento das cheias de projeto que definem o nível máximo maximorum (TR

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

> 10.000), **a Soleira Vertente, a Ombreira Direita e a Ombreira Esquerda da UHE Castro Alves não atendem aos critérios estabelecidos para os casos de carregamento CCE1, CCL1 e CCL2 que são definidos pela cheia com TR de 10.000 anos. Mesmo para o caso de cheia de TR 10.000 anos com drenagem operante a estrutura apresenta uma instabilidade teórica pois resulta em uma base inteiramente tracionada. Além disso, foi feita uma análise da consistência da estrutura apresentada na memória de cálculo do projeto que não se mostrou adequada para os critérios da Eletrobrás (2003)**.
>
> De acordo com as verificações realizadas, a estrutura atende aos critérios da Eletrobrás (2003) para uma cheia de tempo de recorrência de 5 anos. Em 2020 teve um evento com uma vazão de 6.624 m³/s que equivale a uma cheia com TR próxima a 100 anos e a barragem não apresentou problemas nem os instrumentos mediram pressões em níveis superiores ao de alerta. Esse fato, levanta dúvidas sobre os registros de projeto da estrutura. Dessa forma **se recomenda que sejam feitos estudos detalhados para confirmar a geometria, propriedades e as condições da fundação da estrutura para que se possa definir a sua real condição frente aos critérios estabelecidos. E, de posse dos resultados dos estudos que sejam feitas as eventuais intervenções necessárias.** [grifos nossos]

50. Conforme se extrai das conclusões dos estudos de estabilidade, as barragens das UHEs 14 de Julho e Monte Claro mostram-se seguras para todos os casos de carregamentos analisados, incluindo os que consideraram nível máximo *maximorum* de montante para a vazão decamilenar[16] atualizada na RPS, eventos sísmicos e a inoperância dos sistemas de drenagem das barragens.

51. Contudo, o estudo de estabilidade da estrutura de concreto da barragem da UHE Castro Alves identificou instabilidade para alguns cenários de carregamentos, recomendando-se realização avalições detalhadas para confirmar a geometria, as propriedades e as condições da fundação da estrutura para que, em seguida, sejam programadas e feitas as intervenções porventura necessárias.

52. Conforme informações prestadas pela Ceran durante as vistorias, a recomendação do estudo de estabilidade da estrutura de concreto da barragem da UHE Castro Alves foi atendida. Assim, foram desenvolvidos novos estudos para subsidiar a elaboração de projeto de adequação da barragem.

53. O projeto de adequação prevê o aumento da seção transversal do vertedouro em soleira livre, além da otimização de sua superfície hidráulica. Adicionalmente, as ombreiras

[16] Corresponde à vazão de um evento hidrológico extremo com período de retorno de 10.000 anos. É utilizada no dimensionamento e na avaliação da segurança de barragens, garantindo que a estrutura suporte cheias extremamente raras, mas de grande magnitude, sem comprometer sua estabilidade.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

serão elevadas para garantir a proteção das estruturas até o nível d'água de 250 m, assegurando a adequação da borda livre à nova vazão.

54. Dentre os documentos solicitados pelos peritos signatários à Ceran, consta uma nota técnica detalhando as adequações realizadas na barragem da UHE Castro Alves. Esse documento pode ser consultado no Anexo 4 deste laudo técnico.

55. Após uma análise detalhada da nota técnica, concluiu-se que as ações de adequação propostas foram acertadas, pois se basearam em estudos hidrológicos que consideraram as cheias de 2023 – cujas vazões máximas foram superiores às de 2024. Além disso, o aumento da seção transversal e o alteamento das ombreiras foram consideradas soluções eficazes, pois resultam no aumento da força peso do corpo da barragem, o que eleva os coeficientes de segurança nas verificações de estabilidade.

56. Segundo informações prestadas pela Ceran, as obras de adequação da barragem da UHE Castro Alves iniciarão em agosto deste ano, com previsão de conclusão para maio de 2026.

II.II REVISÃO DAS MANCHAS DE INUNDAÇÃO DAS BARRAGENS DAS UHES 14 DE JULHO, MONTE CLARO E CASTRO ALVES EM VISTA DOS RECENTES EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS

57. Os Planos de Ação de Emergência (PAE) das três barragens foram atualizados em 2024 e foram disponibilizados pela Ceran, podendo ser consultados no Anexo 5 desta peça técnica. Constam, dentre as atividades desenvolvidas para a elaboração dos PAEs, as atualizações das manchas de inundação, realizadas por meio de estudos de rompimentos das barragens (*Dam Break*) das UHEs 14 de Julho, Monte Claro e Castro Alves.

58. A pedido dos peritos signatários, a Ceran também disponibilizou uma nota técnica detalhando os parâmetros usados na atualização dos estudos de rompimento que geraram, consequentemente, revisão nas manchas de inundação das barragens – Anexo 6 deste laudo técnico.

59. As simulações dos rompimentos das barragens avaliaram dois cenários, denominados Modo de Ruptura Determinístico 1 – RDC 1 – e Modo de Ruptura Determinístico 2 – RDC 2.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

60. O RDC 1 considerou a ruptura por colapso estrutural dos blocos dos vertedouros sob condições de carregamento normal, ou seja, com base em carregamentos resultantes de uma vazão ordinária, chamada da vazão média de longo termo. Por outro lado, o RDC 2 adotou a ruptura por colapso estrutural dos blocos dos vertedouros em condições de carregamento excepcional, levando em conta os carregamentos resultantes das vazões decamilenares.

61. Segundo a nota técnica da Ceran, as vazões decamilenares utilizadas nos estudos de rompimento de barragens foram as apresentadas a seguir, na Tabela 1.

Tabela 1 – Vazões decamilenares utilizadas nos estudos de rompimento das barragens das UHEs Castro Alves, Monte Claro e 14 de Julho.

Barramento	Vazão decamilenar (m^3/s)
UHE Castro Alves	12.043,00
UHE Monte Claro	21.394,00
UHE 14 de Julho	19.674,00

62. Após a análise de outros documentos fornecidos pela Ceran – incluindo a Revisão dos Estudos Hidrológicos apresentada na última RPS, em 2022 –, verificou-se que a atualização das vazões decamilenares das três barragens, utilizadas nas simulações de rompimento, não considerou os dados das vazões máximas registradas nos eventos climáticos extremos de 2023 e 2024, tendo sido empregadas séries históricas de vazões máximas referentes ao período de 1941 a 2020.

63. Registra-se que a nota técnica também informou que os hidrogramas[17] foram elaborados com base em registros horários das cheias de setembro de 2023, representando um padrão de resposta hidrológica rápido e extremo da bacia, já que foi a cheia que registrou maiores vazões de pico dentre os três extremos climáticos recentes – setembro/2023, novembro/2023 e maio/2024.

64. Em rápida vista, entende-se que as simulações de rompimento de barragens e as revisões das manchas de inundação, realizadas em 2024, deveriam, ao menos, considerar as vazões máximas de 2023 na atualização das vazões decamilenares. Assim, os peritos signatários

[17] Hidrograma é gráfico que representa a variação da vazão de um rio, canal, etc. ao longo do tempo. É uma ferramenta essencial na hidrologia para analisar eventos de cheia, escoamento e comportamento hídrico, auxiliando no dimensionamento e na operação de barragens e outras infraestruturas hidráulicas.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

realizaram estudos de vazões máximas para as três barragens, incluindo os dados de 2021 a 2024, conforme explicado a seguir.

65. Utilizou-se os dados de vazões médias diárias máximas do período de 1941 a 2020, já existentes na Revisão dos Estudos Hidrológicos apresentada na última RPS, em 2022, para as três barragens. Os dados existentes de vazões diárias dos anos de 2021 e 2022 foram coletados diretamente no Portal HidroWeb[18], para as estações fluviométricas referentes aos barramentos das UHEs 14 de Julho, Monte Claro e Castro Alves, cujos códigos são, respectivamente, 86470800, 86448000 e 86305000. Já os valores das vazões médias diárias máximas para 2023 e 2024 foram estimados com base em informações fornecidas pela Ceran.

66. Como os dados obtidos de vazões diárias dos anos de 2021 e 2022 são dados brutos, foi necessário realizar o cálculo das vazões médias diárias. Após isso, foi possível extrair os dados de vazões médias diárias máximas anuais. As séries de vazões médias diárias máximas anuais utilizadas na análise, para as três barragens.

67. Para se estimar a vazão decamilenar, foi adotado um aprimoramento do Método de Gumbel – Distribuição de Gumbel dos Valores Extremos [19] –, desenvolvido por Subramanya[20]. Entre as vantagens do aperfeiçoamento desenvolvido por Subramanya para o Método de Gumbel está o refinamento do ajuste em função da quantidade de dados da amostra e a criação de uma faixa de variação do resultado em função de um nível de confiança escolhido pelo usuário.

68. Para transformar a vazão média diária máxima em vazão máxima de pico, foi utilizado o mesmo coeficiente – 1,25 – adotado na Revisão dos Estudos Hidrológicos apresentada na última RPS, em 2022.

69. Dessarte, apresenta-se a seguir, na Tabela 2, as vazões decamilenares calculadas pelo aprimoramento do Método de Gumbel, desenvolvido por Subramanya, considerando dados de vazões máximas do período de 1941 a 2024 e intervalo de valores para nível de

[18] O Portal HidroWeb é uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e oferece o acesso ao banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), reunindo dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos.

[19] Apresenta esse nome devido ao matemático alemão Emil Julius Gumbel, o qual é autor do livro *Statistics of extremes*, de 1958.

[20] SUBRAMANYA, K. Engineering hydrology. 3. ed. New Delhi: McGraw-Hil, 2008.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

confiança de 80%. Os detalhes dos cálculos, assim como as séries de vazões médias diárias máximas anuais utilizadas, foram disponibilizados no Apêndice B desta peça técnica.

Tabela 2 – Vazões decamilenares atualizadas na RPS de 2022 e as calculadas pelo aprimoramento do Método de Gumbel desenvolvido por Subramanya, considerando dados de vazões máximas do período de 1941 a 2024.

Barramento	Vazão decamilenar atualizada pela RPS de 2022 (m^3/s)	Vazões decamilenares Gumbel - Subramanya Intervalo para nível de de confiança de 80%		
		Valor central (m^3/s)	Mínimo (m^3/s)	Máximo (m^3/s)
UHE Castro Alves	12.043,00	15.360,55	13.351,78	17.369,31
UHE Monte Claro	21.394,00	25.579,35	22.302,58	28.856,13
UHE 14 de Julho	19.674,00	24.360,65	21.229,10	27.492,20

70. Como pode ser verificado do exame da Tabela 2, as vazões decamilenares estimadas pelo Método de Gumbel-Subramanya, considerando os dados de vazões máximas de 2021 a 2024, foram cerca de 20 a 27% superiores aos apresentados na RPS de 2022, que usaram dados históricos de vazões máximas somente até 2020. Verifica-se, ainda, que as vazões decamilenares da RPS de 2022 ficaram abaixo até mesmo do limite mínimo do intervalo para nível de confiança de 80% do Método de Gumbel-Subramanya.

71. Diante do exposto, há evidências suficientes para justificar a revisão das manchas de inundação das três barragens, no Modo de Ruptura Determinístico 2 – RDC 2 –, considerando o carregamento excepcional resultante da vazão decamilenar, cuja determinação deve incluir os dados de vazões máximas registradas durante os eventos climáticos extremos de 2023 e 2024.

II.III REVISÃO DO CRONOGRAMA DE SIMULADOS DE MESA E DE EVACUAÇÃO

72. Acerca de eventual pertinência na revisão do cronograma de simulados de mesa e de evacuação, averiguou-se, nos autos, que a Ceran prestou os seguintes esclarecimentos:

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

72.1. Foram realizados simulados de evacuação de emergência nas Zonas de Autossalvamento (ZAS) das UHEs Castro Alves, Monte Claro e 14 de Julho, respectivamente, em 30/10/2023, 08/02/2024 e 29/02/2024. Esses exercícios contaram com a participação da população e das Defesas Civis, conforme registrado em relatório técnico, fotografias e listas de presença anexadas ao processo. A divulgação dessas ações foi feita por meio de rádios locais, redes sociais e distribuição de folders nas ZAS;

72.2. Os próximos simulados de mesa, que têm como propósito aprimorar a comunicação entre os órgãos envolvidos em situações emergenciais, estão programados para setembro/2024 (UHE Castro Alves), setembro/2025 (UHE Monte Claro) e setembro/2026 (UHE 14 de Julho). Já os exercícios de evacuação, que visam orientar previamente os moradores da região sobre os procedimentos a serem seguidos, estão agendados para maio/2025 (UHE Castro Alves), maio/2026 (UHE Monte Claro) e fevereiro/2027 (UHE 14 de Julho).

72.3. A periodicidade da realização dos simulados de evacuação foi definida em alinhamento com a Defesa Civil, conforme estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei 12.334/2010) e a Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 1.064, de 02/05/2023.

73. O exame da Lei 12.334/2010 evidencia que o empreendedor, em conjunto com os órgãos locais de proteção e defesa civil, deve realizar exercícios práticos de simulação de situações de emergência com a população da área potencialmente afetada por uma eventual ruptura da barragem, obedecendo à periodicidade definida pelo órgão fiscalizador, conforme transcrito a seguir.

> Art. 12. O PAE estabelecerá as ações a serem executadas pelo empreendedor da barragem em caso de situação de emergência, bem como identificará os agentes a serem notificados dessa ocorrência, devendo contemplar, pelo menos:
>
> [...]
>
> § 5º O empreendedor deverá, juntamente com os órgãos locais de proteção e defesa civil, realizar, **em periodicidade a ser definida pelo órgão**

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

> **fiscalizador**, exercício prático de simulação de situação de emergência com a população da área potencialmente afetada por eventual ruptura da barragem. [grifo nosso]

74. Por seu turno, a ANEEL estabeleceu, através da Resolução Normativa 1.064/2023, cujo trecho de interesse é reproduzido a seguir, que o exercício prático de simulação de situação de emergência deve ser realizado com a população da ZAS com frequência e organização definida conjuntamente com os órgãos de proteção e defesa civil e que a frequência para realização do exercício prático de simulação não deve exceder 3 anos, salvo manifestação dos órgãos de proteção e defesa civil competentes.

> Art. 13. O Plano de Ação de Emergência – PAE é parte integrante do Plano de Segurança e estabelecerá as ações a serem executadas pelo empreendedor da barragem, em caso de situação de emergência, bem como identificará as entidades a serem notificadas dessa ocorrência.
>
> [...]
>
> § 8º O exercício prático de simulação de situação de emergência deve ser realizado com a população da ZAS **com frequência e organização definida conjuntamente com os órgãos de proteção e defesa civil**, no que couber.
>
> § 9º **A frequência** para realização do exercício prático de simulação de que trata o §8º **não deverá exceder 3 anos**, salvo manifestação dos órgãos de proteção e defesa civil competentes. [grifos nossos]

75. As datas dos últimos simulados de evacuação realizados e dos próximos programados, bem como o período de tempo entre eles, foram sintetizados na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 – Datas dos últimos simulados de evacuação realizados, dos próximos programados e do período de tempo entre eles.

Barramento	Datas dos últimos simulados de evacuação realizados	Datas dos próximos simulados de evacuação programados	Período entre o último simulado realizado e o próximo agendado
UHE Castro Alves	30/10/2023	maio/2025	≈ 19 meses = 1,58 ano
UHE Monte Claro	08/02/2024	maio/2026	≈ 27 meses = 2,25 anos
UHE 14 de Julho	29/02/2024	fevereiro/2027	≈ 36 meses = 3 anos

76. A análise da Tabela 3 revela que o intervalo entre os últimos simulados de evacuação realizados e os próximos programados varia de 1,58 a 3 anos, estando, portanto, dentro do prazo máximo estipulado pela ANEEL.

77. Ressalta-se, contudo, que, embora a Ceran tenha informado que a periodicidade dos simulados de evacuação foi definida em conjunto com a Defesa Civil, não foi possível

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

localizar, nos autos ou em outros documentos disponibilizados, qualquer comprovação da anuência dos órgãos de proteção e defesa civil competentes em relação ao cronograma proposto na Carta CERAN-0027/2024 (Docs 10.9 e 28.6 dos autos).

78. Dessa forma, considerando que as frequências dos exercícios práticos de simulação propostos para as três UHEs não excederam 3 anos, conforme determinado pela ANEEL, para que haja pleno cumprimento das determinações legais e normativas, resta apenas demonstrar que a definição da periodicidade dos simulados de evacuação ocorreu em consonância com os órgãos de proteção e defesa civil competentes.

79. Assim, sugere-se que a Ceran se manifeste e apresente comprovação de que o cronograma dos simulados de evacuação foi, de fato, estabelecido em alinhamento com os órgãos de proteção e defesa civil competentes.

III CONCLUSÃO

80. Visando a atender à demanda contida na SP 3971/2024, realizou-se o exame dos documentos disponibilizados e foi realizada perícia e campo, com o objetivo de avaliar a segurança estrutural das barragens das UHEs 14 de Julho, Monte Claro e Castro Alves. Também foi feito exame quanto à pertinência de que seja revisada as manchas de inundação dos barramentos, em vista dos eventos climáticos extremos que têm assolado a região, e de que seja revisto o cronograma de simulados de mesa e de evacuação, exigindo-se ajustes nos PSBs e nos correspondentes PAEs.

81. As principais conclusões sobre a segurança estrutural das barragens das UHEs 14 de Julho, Monte Claro e Castro Alves são apresentadas a seguir. Maiores detalhes podem ser obtidos em consulta à íntegra da Seção II.I desta peça técnica.

81.1. **Barragem da UHE 14 de Julho:** as medidas adotadas e em andamento por parte da Ceran são condizentes com a magnitude dos danos resultantes do evento climático extremo ocorrido em maio de 2024. Nesse contexto, a avaliação conduzida pelos peritos signatários, tanto por meio da inspeção *in loco* quanto pela análise dos documentos disponibilizados, indica que as ações implementadas são adequadas para restabelecer as condições geométricas originais da barragem. Ademais, observa-se um incremento na resistência global da estrutura,

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

notadamente pelo reforço estrutural em execução no Bloco 17. Dessa forma, depreende-se que, com a conclusão de todas as etapas do processo de recuperação da barragem, a segurança da represa será plenamente restabelecida;

81.2. **Barragens das UHEs Monte Claro e Castro Alves:** a avaliação realizada pelos peritos signatários, com base nas constatações da inspeção *in loco*, indica que as barragens das UHEs Monte Claro e Castro Alves apresentam condições de segurança, sem evidências de riscos iminentes que comprometam sua estabilidade ou possam levar à sua ruptura;

81.3. **Ações da Ceran para aprimoramento da operação das comportas das barragens:** considerou-se que as medidas adotadas pela Ceran são adequadas para mitigar riscos de inviabilidade de operação das comportas no futuro. As ações aumentam a confiabilidade dos mecanismos, assegurando que, mesmo em cenários excepcionais, a operação das comportas possa ser realizada de forma satisfatória;

81.4. **Estudos de estabilidade das estruturas de concreto das barragens:** os estudos de estabilidade das barragens das UHEs 14 de Julho e Monte Claro demonstraram que as estruturas são seguras para todos os casos de carregamentos analisados, incluindo casos extraordinários. Após detido exame dos mencionados estudos, concluiu-se que possuem correto embasamento técnico e foram considerados adequados. Quanto à barragem da UHE Castro Alves, concluiu-se que as ações de adequação propostas foram acertadas, pois se basearam em estudos hidrológicos que consideraram as cheias de 2023 – cujas vazões máximas foram superiores às de 2024. Além disso, o aumento da seção transversal e o alteamento das ombreiras foram consideradas soluções eficazes, já que resultam no aumento da força peso do corpo da barragem, o que eleva os coeficientes de segurança nas verificações de estabilidade.

82. Quanto à análise sobre a pertinência de que seja revisada as manchas de inundações dos barramentos em vista dos eventos climáticos extremos que têm assolado a

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

região, concluiu-se que há evidências suficientes para justificar a revisão das manchas de inundação das três barragens, no Modo de Ruptura Determinístico 2 – RDC 2 –, considerando o carregamento excepcional resultante da vazão decamilenar, cuja determinação deve incluir os dados de vazões máximas registradas durante os eventos climáticos extremos de 2023 e 2024. Maiores detalhes podem ser obtidos em consulta à íntegra da Seção II.II deste laudo técnico.

83. Por fim, acerca do exame quanto à pertinência de que seja revisto o cronograma de simulados de mesa e de evacuação, exigindo-se ajustes no PSB e no correspondente PAE, concluiu-se que o intervalo entre os últimos simulados de evacuação realizados e os próximos programados varia de 1,58 a 3 anos, estando, portanto, dentro do prazo máximo estipulado pela ANEEL, por meio da Resolução Normativa 1.064/2023.

84. Entretanto, embora a Ceran tenha informado que a periodicidade dos simulados de evacuação foi definida em conjunto com a Defesa Civil, não foi possível localizar, nos autos ou em outros documentos disponibilizados, qualquer comprovação da anuência dos órgãos de proteção e defesa civil competentes em relação ao cronograma proposto na Carta CERAN-0027/2024 (Docs 10.9 e 28.6 dos autos), restando demonstrar que a definição da periodicidade dos simulados de evacuação ocorreu em consonância com os referidos entes.

85. Assim, sugere-se que a Ceran se manifeste e apresente comprovação de que o cronograma dos simulados de evacuação foi, de fato, estabelecido em alinhamento com os órgãos de proteção e defesa civil competentes. Maiores detalhes podem ser obtidos em consulta à íntegra da Seção II.III desta peça técnica.

86. Nesses termos, dá-se por concluído o presente laudo técnico, com 26 páginas, ficando os peritos subscritos à disposição para quaisquer esclarecimentos que se façam necessários.

É o Laudo.

Brasília/DF e Porto Alegre/RS, *data da assinatura digital*.

[*assinado digitalmente*]
FELIPE EUGENIO DE O. V. SAMPAIO
Analista do MPU/Perito em Engenharia Civil
Assessoria Nacional de Perícia em Engenharia e Arquitetura

[*assinado digitalmente*]
VALTER GIUGNO ABRUZZI
Analista do MPU/Perito em Engenharia Civil
Assessoria Nacional de Perícia em Engenharia e Arquitetura

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

APÊNDICES E ANEXOS

APÊNDICE A – Relatório Fotográfico, com capa e mais 17 páginas;

APÊNDICE B – Detalhes dos cálculos das vazões decamilenares realizados pelo Método de Gumbel-Subramanya, com capa e mais 6 páginas;

ANEXO 1 – Apresentação da Ceran realizada no primeiro dia das vistorias, com capa e mais 61 páginas;

ANEXO 2 – Relatório de Recuperação da barragem da UHE 14 de Julho, com capa e mais 30 páginas;

ANEXO 3 – Relatórios técnicos das Revisões Periódicas de Segurança (RPS) realizadas em 2022 referentes às barragens das UHEs Castro Alves, Monte Claro e 14 de Julho, com capa e mais 142 páginas;

ANEXO 4 – Nota Técnica da Ceran sobre estudos hidrológicos e adequação das estruturas da barragem da UHE Castro Alves, com capa e mais 17 páginas;

ANEXO 5 – Planos de Ação de Emergência (PAE) das barragens das UHEs Castro Alves, Monte Claro e 14 de Julho, com capa e mais 172 páginas;

ANEXO 6 – Nota Técnica da Ceran sobre Parâmetros da atualização dos estudos de rompimento das barragens das UHEs Castro Alves, Monte Claro e 14 de Julho, com capa e mais 71 páginas.

Assinatura digital conjunta, primeira assinatura em 07/03/2025 15:11. Para verificar a autenticidade acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL

Assinatura/Certificação do documento **PGR-00076976/2025 LAUDO TÉCNICO nº 225-2025**

Signatário(a): **FELIPE EUGENIO DE OLIVEIRA VAZ SAMPAIO**
Data e Hora: **07/03/2025 15:11:26**
Assinado em nuvem

Signatário(a): **VALTER GIUGNO ABRUZZI**
Data e Hora: **07/03/2025 15:57:31**
Assinado em nuvem

Acesse http://www.transparencia.mpf.mp.br/validacaodocumento. Chave df778b63.45e8a94f.190917cd.f794fa0c

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 1

ipcc

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE **MUDANÇA DO CLIMA**

MUDANÇA DO CLIMA 2023

Relatório Síntese

Um Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima



WMO UNEP

Informações sobre a versão traduzida à língua portuguesa

Coordenação
Alexander Rose
Lucas Tiago Araújo
Márcio Rojas da Cruz
Maria Fernanda Pistori
Paloma Capistrano Pinheiro

Tradução
SJR Assessoria e Tradução LTDA

Revisão
Antônio Marcos Mendonça
Diogo Victor Santos
Eliana Macedo
Elisa Badziack, EN2 Consultoria Ambiental
Ricardo Vieira Araujo
Sonia Regina Mudrovitsch de Bittencourt

Diagramação
Pituri

Esta tradução do **Relatório Síntese do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC** não é uma tradução oficial do IPCC. Foi realizada pelo Governo do Brasil e pelo Pacto Global da ONU no Brasil com o objetivo de refletir da forma mais precisa a linguagem usada no texto original.

Como órgão das Nações Unidas, o IPCC publica os seus relatórios nas seis línguas oficiais da ONU (árabe, chinês, inglês, francês, russo, espanhol). Versões nesses idiomas estão disponíveis para download em www.ipcc.ch. Para mais informações, entre em contato com o Secretariado do IPCC (Endereço: 7bis Avenue de la Paix, C.P. 2300, 1211 Geneva 2, Suíça; e-mail: ipcc-sec@wmo.int).

UN GLOBAL COMPACT Pacto Global Rede Brasil

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

GOVERNO FEDERAL BRASIL UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

MUDANÇA DO CLIMA 2023

Relatório Síntese

Editado por

A Equipe Principal de Redação
Relatório Síntese
IPCC

Hoesung Lee
Presidente
IPCC

José Romero
Chefe da Unidade de Apoio Técnico
IPCC

Equipe Principal de Redação

Hoesung Lee (Presidente), Katherine Calvin (EUA), Dipak Dasgupta (Índia/EUA), Gerhard Krinner (França/Alemanha), Aditi Mukherji (Índia), Peter Thorne (Irlanda/Reino Unido), Christopher Trisos (África do Sul), José Romero (Suíça), Paulina Aldunce (Chile), Ko Barrett (EUA), Gabriel Blanco (Argentina), William W. L. Cheung (Canadá), Sarah L. Connors (França/Reino Unido), Fatima Denton (Gâmbia), Aïda Diongue-Niang (Senegal), David Dodman (Jamaica/Reino Unido/Países Baixos), Matthias Garschagen (Alemanha), Oliver Geden (Alemanha), Bronwyn Hayward (Nova Zelândia), Christopher Jones (Reino Unido), Frank Jotzo (Austrália), Thelma Krug (Brasil), Rodel Lasco (Filipinas), June-Yi Lee (República da Coreia), Valérie Masson-Delmotte (França), Malte Meinshausen (Austrália/Alemanha), Katja Mintenbeck (Alemanha), Abdalah Mokssit (Marrocos), Friederike E. L. Otto (Reino Unido/Alemanha), Minal Pathak (Índia), Anna Pirani (Itália), Elvira Poloczanska (Reino Unido/Austrália), Hans-Otto Pörtner (Alemanha), Aromar Revi (Índia), Debra C. Roberts (África do Sul), Joyashree Roy (Índia/Tailândia), Alex C. Ruane (EUA), Jim Skea (Reino Unido), Priyadarshi R. Shukla (Índia), Raphael Slade (Reino Unido), Aimée Slangen (Países Baixos), Youba Sokona (Mali), Anna A. Sörensson (Argentina), Melinda Tignor (EUA/Alemanha), Detlef van Vuuren (Países Baixos), Yi-Ming Wei (China), Harald Winkler (África do Sul), Panmao Zhai (China), Zinta Zommers (Letônia)

Unidade de Apoio Técnico ao Relatório Síntese

José Romero (Suíça), Jinmi Kim (República da Coreia), Erik F. Haites (Canadá), Yonghun Jung (República da Coreia), Robert Stavins (EUA), Arlene Birt (EUA), Meeyoung Ha (República da Coreia), Dan Jezreel A. Orendain (Filipinas), Lance Ignon (EUA), Semin Park (República da Coreia), Youngin Park (República da Coreia)

Referência a este relatório:

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

Equipe Estendida de Redação

Jean-Charles Hourcade (França), Francis X. Johnson (Tailândia/Suécia), Shonali Pachauri (Áustria/Índia), Nicholas P. Simpson (África do Sul/Zimbabwe), Chandni Singh (Índia), Adelle Thomas (Bahamas), Edmond Totin (Benim)

Editores de Revisão

Paola Arias (Colômbia), Mercedes Bustamante (Brasil), Ismail Elgizouli (Sudão), Gregory Flato (Canadá), Mark Howden (Austrália), Carlos Méndez (Venezuela), Joy Jacqueline Pereira (Malásia), Ramón Pichs-Madruga (Cuba), Steven K Rose (EUA), Yamina Saheb (Argélia/França), Roberto Sánchez Rodríguez (México), Diana Ürge-Vorsatz (Hungria), Cunde Xiao (China), Noureddine Yassaa (Argélia)

Autores Contribuintes

Andrés Alegría (Alemanha/Honduras), Kyle Armour (EUA), Birgit Bednar-Friedl (Áustria), Kornelis Blok (Holanda), Guéladio Cissé (Suíça/Mauritânia/França), Frank Dentener (UE/Países Baixos), Siri Eriksen (Noruega), Erich Fischer (Suíça), Gregory Garner (EUA), Céline Guivarch (França), Marjolijn Haasnoot (Países Baixos), Gerrit Hansen (Alemanha), Mathias Hauser (Suíça), Ed Hawkins (Reino Unido), Tim Hermans (Holanda), Robert Kopp (EUA), Noëmie Leprince-Ringuet (França), Jared Lewis (Austrália/Nova Zelândia), Debora Ley (México/Guatemala), Chloé Ludden (Alemanha/França), Leila Niamir (Irã/Holanda/Áustria), Zebedee Nicholls (Austrália), Shreya Some (Índia/Tailândia), Sophie Szopa (França), Blair Trewin (Austrália), Kaj-Ivar van der Wijst (Países Baixos), Gundula Winter (Holanda/Alemanha), Maximilian Witting (Alemanha)

Comitê de Coordenação Científica

Hoesung Lee (Presidente, IPCC), Amjad Abdulla (Maldivas), Edvin Aldrian (Indonésia), Ko Barrett (Estados Unidos da América), Eduardo Calvo (Peru), Carlo Carraro (Itália), Diriba Korecha Dadi (Etiópia), Fatima Driouech (Marrocos), Andreas Fischlin (Suíça), Jan Fuglestvedt (Noruega), Thelma Krug (Brasil), Nagmeldin G.E. Mahmoud (Sudão), Valérie Masson-Delmotte (França), Carlos Méndez (Venezuela), Joy Jacqueline Pereira (Malásia), Ramón Pichs-Madruga (Cuba), Hans-Otto Pörtner (Alemanha), Andy Reisinger (Nova Zelândia), Debra C. Roberts (África do Sul), Sergey Semenov (Federação Russa), Priyadarshi Shukla (Índia), Jim Skea (Reino Unido), Youba Sokona (Mali), Kiyoto Tanabe (Japão), Muhammad Irfan Tariq (Paquistão), Diana Ürge-Vorsatz (Hungria), Carolina Vera (Argentina), Pius Yanda (República Unida da Tanzânia), Noureddine Yassaa (Argélia), Taha M. Zatari (Arábia Saudita), Panmao Zhai (China)

Concepção Visual e Design de Informação

Arlene Birt (EUA), Meeyoung Ha (República da Coreia)

Capa: Concebida por Meeyoung Ha, IPCC SYR TSU

Referência Fotográfica

"Fog opening the dawn" de Chung Jin Sil

The Weather and Climate Photography & Video Contest 2021, Korea Meteorological Administration
http://www.kma.go.kr/kma © KMA

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA

© Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima, 2023

ISBN 978-92-9169-164-7

As designações utilizadas e a apresentação do material em mapas não implicam a manifestação de qualquer opinião por parte do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima com relação à situação jurídica de qualquer país, território, cidade ou área ou de suas autoridades, ou com relação à delimitação de suas fronteiras ou limites. A menção de empresas ou produtos específicos não implica que sejam apoiados ou recomendados pelo IPCC em detrimento de outros de natureza semelhante, que não são mencionados ou anunciados. O IPCC se reserva o direito de publicação impressa, eletrônica e em qualquer outra forma e em qualquer idioma.

Pequenos trechos desta publicação podem ser reproduzidos sem autorização, desde que a fonte completa seja claramente indicada.

Correspondência editorial e solicitações de publicação, reprodução ou tradução de artigos, em parte ou no todo, devem ser endereçados a: IPCC c/o World Meteorological Organization (WMO) 7bis, avenue de la Paix Tel.: +41 22 730 8208 PO Box 2300 Fax: +41 22 730 8025 CH 1211 Genebra 2, Suíça E-mail: IPCC-Sec@wmo.int www.ipcc.ch

Apresentação e Prefácio

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 7

Apresentação

Este Relatório Síntese (SYR) conclui o Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC). O SYR sintetiza e integra os materiais contidos nos três Relatórios de Avaliação dos Grupos de Trabalho e nos Relatórios Especiais que contribuem para o AR6. Ele aborda uma ampla gama de questões politicamente relevantes, mas neutras em termos de política, aprovadas pelo Painel.

O SYR é a síntese da avaliação mais abrangente da mudança do clima realizada até o momento pelo IPCC: Mudança do Clima 2021: A Base das Ciências Físicas; Mudança do Clima 2022: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade; e Mudança do Clima 2022: Mitigação da Mudança do Clima. O SYR também se baseia nas constatações dos Relatórios Especiais concluídos como parte da Sexta Avaliação – Aquecimento Global de 1,5°C (2018): um Relatório Especial do IPCC sobre os impactos do aquecimento global de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais e os caminhos de emissões globais de gases de efeito estufa relacionados, no contexto do fortalecimento da resposta global à ameaça da mudança do clima, do desenvolvimento sustentável e dos esforços para erradicar a pobreza (SR1.5); Mudança do Clima e Terra (2019): um Relatório Especial do IPCC sobre mudança do clima, desertificação, degradação do solo, manejo sustentável do solo, segurança alimentar e fluxos de gases de efeito estufa em ecossistemas terrestres (SRCCL); e O Oceano e a Criosfera de um Clima em Mudança (2019) (SROCC).

O AR6 SYR confirma que o uso insustentável e desigual de energia e da terra, bem como mais de um século de queima de combustíveis fósseis, inequivocamente causaram o aquecimento global, com a temperatura da superfície global atingindo 1,1°C a mais que no período de 1850–1900 em 2011–2020. Isto vem resultando em impactos adversos generalizados e perdas e danos relacionados à natureza e às pessoas. Os compromissos de contribuições nacionalmente determinadas (NDCs) até 2030 mostram que a temperatura aumentará em 1,5°C na primeira metade da década de 2030, e será muito difícil controlar o aumento da temperatura dentro de 2,0°C até o final do século XXI. Cada incremento no aquecimento global intensificará os riscos múltiplos e simultâneos em todas as regiões do mundo.

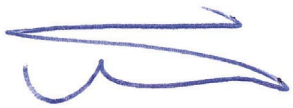
O relatório aponta que a limitação do aquecimento global causado pelo homem requer emissões líquidas zero de CO_2. A mitigação profunda, rápida e sustentada e a implementação acelerada de ações de adaptação nesta década reduziriam as perdas e os danos projetados para os seres humanos e ecossistemas e proporcionariam muitos co-benefícios, especialmente para a qualidade do ar e saúde. Ações atrasadas de mitigação e adaptação bloqueariam a infraestrutura de altas emissões, aumentariam os riscos de ativos ociosos e escalada de custos, reduziriam a viabilidade e aumentariam as perdas e danos. Ações de curto prazo envolvem altos investimentos iniciais e mudanças potencialmente perturbadoras que podem ser atenuadas por uma série de políticas facilitadoras.

Como um órgão intergovernamental estabelecido em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), o IPCC vem fornecendo aos formuladores de políticas as avaliações científicas e técnicas mais confiáveis e objetivas do campo. A partir de 1990, essa série de Relatórios de Avaliação, Relatórios Especiais, Documentos Técnicos, Relatórios Metodológicos e outros produtos do IPCC se tornaram obras de referência padrão.

O SYR foi possível graças ao trabalho voluntário, à dedicação e ao compromisso de milhares de especialistas e cientistas de todo o mundo, representando uma variedade de pontos de vista e disciplinas. Gostaríamos de expressar nossa profunda gratidão a todos os membros da Equipe de Redação Principal do SYR, aos membros da Equipe de Redação Ampliada, aos Autores Colaboradores e aos Editores Revisores, que assumiram com entusiasmo o enorme desafio de produzir um SYR excepcional, para além das outras tarefas com as quais já haviam se comprometido durante o ciclo do AR6. Gostaríamos também de agradecer à equipe da Unidade de Suporte Técnico do SYR e ao Secretariado do IPCC por sua dedicação na organização da produção deste relatório do IPCC.

Também gostaríamos de reconhecer e agradecer aos governos dos países membros do IPCC por seu apoio aos cientistas na elaboração deste relatório e por suas contribuições ao Fundo Fiduciário do IPCC para fornecer a base para a participação de especialistas de países em desenvolvimento e países com economias em transição. Gostaríamos de expressar nossa gratidão ao governo de Singapura por sediar a Reunião de Escopo do SYR, ao governo da Irlanda por sediar a terceira reunião da Equipe de Redação Principal do SYR e ao governo da Suíça por sediar a 58ª Sessão do IPCC, onde o SYR foi aprovado. O generoso apoio financeiro do governo da República da Coreia permitiu o bom funcionamento da Unidade de Suporte Técnico do SYR. E é com gratidão que reconhecemos esse apoio.

Gostaríamos especialmente de expressar nossa gratidão ao presidente, aos vice-presidentes e aos co-presidentes do IPCC por seu dedicado trabalho durante a produção deste relatório.



Petteri Taalas

Secretário-Geral da Organização Meteorológica Mundial



Inger Andersen

Secretária-Geral Adjunta das Nações Unidas e Diretora Executiva do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 9

Prefácio

Este Relatório Síntese (SYR) constitui o produto final do Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC). Ele resume o nível do conhecimento sobre a mudança do clima, seus impactos e riscos generalizados e a mitigação e adaptação à mudança do clima com base na literatura científica, técnica e socioeconômica revisada por pares desde a publicação do Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC em 2014.

Este SYR destila, sintetiza e integra as principais conclusões das três contribuições do Grupo de Trabalho – Mudança do Clima 2021: A Base das Ciências Físicas; Mudança do Clima 2022: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade; e Mudança do Clima 2022: Mitigação da Mudança do Clima. O SYR também se baseia nas constatações dos Relatórios Especiais concluídos como parte da Sexta Avaliação – Aquecimento Global de 1,5°C (2018): um Relatório Especial do IPCC sobre os impactos do aquecimento global de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais e os caminhos de emissões globais de gases de efeito estufa relacionados, no contexto do fortalecimento da resposta global à ameaça da mudança do clima, do desenvolvimento sustentável e dos esforços para erradicar a pobreza (SR1.5); Mudança do Clima e Terra (2019): um Relatório Especial do IPCC sobre mudança do clima, desertificação, degradação do solo, manejo sustentável do solo, segurança alimentar e fluxos de gases de efeito estufa em ecossistemas terrestres (SRCCL); e O Oceano e a Criosfera de um Clima em Mudança (2019) (SROCC). O SYR, portanto, é uma compilação abrangente e oportuna das mais recentes avaliações da literatura científica, técnica e socioeconômica sobre mudança do clima.

Escopo do relatório

O SYR é uma síntese independente do material mais politicamente relevante baseado na literatura científica, técnica e socioeconômica avaliada durante a Sexta Avaliação. Este relatório integra as principais conclusões dos relatórios do Grupo de Trabalho do AR6 e dos três Relatórios Especiais do AR6. Ele reconhece a interdependência entre clima, ecossistemas e biodiversidade e sociedades humanas; o valor de diversas formas de conhecimento; e a estreita ligação entre adaptação à mudança do clima, mitigação, saúde dos ecossistemas, bem-estar humano e desenvolvimento sustentável. Com base em múltiplas estruturas analíticas, incluindo as das ciências físicas e sociais, este relatório identifica oportunidades de ação transformadora que são transições de sistemas efetivas, viáveis, justas e equitativas e caminhos de desenvolvimento resilientes. Diferentes esquemas de classificação regional são utilizados para aspectos físicos, sociais e econômicos, refletindo a literatura subjacente.

O Relatório Síntese enfatiza os riscos de curto prazo e as opções para lidar com eles, buscando fornecer aos formuladores de políticas uma noção da urgência necessária para tratar da mudança global do clima. O relatório também fornece informações importantes sobre como os riscos climáticos interagem não apenas entre si, mas também com riscos não relacionados ao clima. Ele descreve a interação entre mitigação adaptação e a forma como esta combinação pode melhor nenfrentar o desafio climático e produzir co-benefícios valiosos. Ele destaca a forte conexão entre equidade e ação climática e por que soluções mais equitativas são vitais para lidar com a mudança do clima. Ele também enfatiza como a crescente urbanização oferece uma oportunidade para uma ação climática ambiciosa visando promover o desenvolvimento resiliente ao clima e o desenvolvimento sustentável para todos. E ressalta como a restauração e a proteção dos ecossistemas terrestres e oceânicos podem trazer múltiplos benefícios para a biodiversidade e outras metas sociais, ao passo que não o fazer representa um enorme risco para a garantia de um planeta saudável.

Estrutura

O SYR inclui um Resumo para Formuladores de Políticas (SPM) e um relatório mais longo do qual o SPM é derivado, além de anexos.

Para facilitar o acesso aos resultados do SYR para um público amplo, cada parte do SPM traz as principais conclusões. Juntas, essas 18 principais conclusões fornecem um resumo abrangente em linguagem simples e não técnica para a fácil assimilação por leitores de diferentes esferas da vida.

O SPM segue uma estrutura e sequência semelhantes às do relatório mais longo, mas algumas questões abordadas em mais de uma seção do relatório mais longo são resumidas em um único local no SPM. Cada parágrafo do SPM contém referências ao texto de apoio no relatório mais longo. Por sua vez, o relatório mais longo contém referências extensas a partes relevantes dos Relatórios do Grupo de Trabalho ou dos Relatórios Especiais mencionados acima.

O relatório mais longo está estruturado em torno de três tópicos principais, conforme determinado pelo Painel. Uma breve introdução (Seção 1) é seguida por três seções.

A Seção 2, "Situação Atual e Tendências", começa com a avaliação das evidências observacionais da mudança do nosso clima, dos fatores históricos e atuais da mudança do clima induzida pelo homem e de seus impactos. Avalia, também, a implementação atual das opções de resposta para adaptação e mitigação. A Seção 3, 'Perspectivas Climáticas e de Desenvolvimento de Longo Prazo', fornece uma avaliação de longo prazo da mudança do clima até 2100 e além sob uma ampla gama de perspectivas socioeconômicas. Nela são considerados os impactos, os riscos e os custos de longo prazo nos caminhos de adaptação e mitigação no contexto do desenvolvimento sustentável. A seção 4, 'Respostas de Curto Prazo para um Clima em Transformação', avalia as oportunidades para ampliar as ações efetivas no período até 2040, no contexto das promessas e compromissos climáticos e da busca do desenvolvimento sustentável.

Os anexos contendo um glossário de termos utilizados, lista de acrônimos, autores, Editores de Revisão, o Comitê Científico Diretor do SYR e revisores especialistas completam o relatório.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 10

Processo

O SYR foi elaborado de acordo com os procedimentos do IPCC. Uma reunião de escopo para desenvolver um esboço detalhado do Relatório Síntese do AR6 foi realizada em Singapura, de 21 a 23 de outubro de 2019, tendo o esboço produzido nessa reunião sido aprovado pelo Painel na 52ª Sessão do IPCC, de 24 a 28 de fevereiro de 2020, em Paris, França.

De acordo com os procedimentos do IPCC, o Presidente do IPCC, em consulta com os Co-Presidentes dos Grupos de Trabalho, indicou autores para a Equipe de Redação Principal (CWT) do SYR. Um total de 30 membros do CWT e 9 Editores de Revisão foram selecionados e aceitos pelo Bureau do IPCC em sua 58ª sessão, em 19 de maio de 2020. No processo de desenvolvimento do SYR, 7 autores da Equipe de Redação Ampliada (EWT) foram selecionados pela CWT e aprovados pelo Presidente e pelo Bureau do IPCC, e 28 Autores Contribuintes foram selecionados pela CWT com a aprovação do Presidente. Esses autores adicionais foram selecionados para aprimorar e aprofundar a experiência necessária para a elaboração do Relatório. O Presidente estabeleceu, na 58ª Sessão do Bureau, um Comitê Científico Diretor (SSC) do SYR com o mandato de aconselhar o desenvolvimento do SYR. O SSC do SYR era composto pelos membros do Bureau do IPCC, exceto os membros que já atuavam como Editores de Revisão do SYR.

Devido à pandemia de Covid-19, as duas primeiras reuniões da CWT foram realizadas virtualmente, de 25 a 29 de janeiro de 2021 e de 16 a 20 de agosto de 2021. A Minuta de Primeira Ordem (FOD) foi liberada para especialistas e governos para análise em 10 de janeiro de 2022, com comentários até 20 de março de 2022. A CWT se reuniu em Dublin, de 25 a 28 de março de 2022, para discutir a melhor forma de revisar a FOD e abordar os mais de 10.000 comentários recebidos. Os Editores de Revisão monitoraram o processo de revisão para garantir que todos os comentários recebessem a devida consideração. O IPCC distribuiu uma versão final do Sumário para Formuladores de Políticas e um relatório mais longo do SYR aos governos para revisão de 21 de novembro de 2022 a 15 de janeiro de 2023, que resultou em mais de 6.000 comentários. Uma minuta final do SYR para aprovação, incorporando os comentários da distribuição final do governo, foi enviada aos governos membros do IPCC em 8 de março de 2023.

O Painel, em sua 58ª Sessão realizada de 13 a 17 de março de 2023 em Interlaken, Suíça, aprovou o SPM linha por linha e adotou o relatório mais longo seção por seção.

Agradecimentos

O SYR foi possível graças ao trabalho árduo e ao compromisso com a excelência demonstrado pelos Facilitadores da Seção, membros da CWT e da EWT e Autores Colaboradores. Agradecemos especificamente aos Facilitadores de Seção Kate Calvin, Dipak Dasgupta, Gerhard Krinner, Aditi Mukherji, Peter Thorne e Christopher Trisos, cujo trabalho foi essencial para garantir o alto padrão das seções do relatório mais longo e do SPM.

Gostaríamos de expressar nossa gratidão aos governos membros do IPCC, às organizações observadoras e aos revisores especialistas por fornecerem comentários construtivos sobre os relatórios preliminares. Gostaríamos de agradecer aos Editores de Revisão Paola Arias, Mercedes Bustamante, Ismail Elgizouli, Gregory Flato, Mark Howden, Steven Rose, Yamina Saheb, Roberto Sánchez e Cunde Xiao por seu trabalho no tratamento dos comentários da FOD, e também a Gregory Flato, Carlos Méndez, Joy Jacqueline Pereira, Ramón Pichs-Madruga, Diana Ürge-Vorsatz e Noureddine Yassaa por seu trabalho durante a sessão de aprovação, colaborando com as equipes de autores para garantir a consistência entre o SPM e os relatórios subjacentes.

Agradecemos aos membros do SSC pelos seus atenciosos conselhos e pelo apoio ao SYR durante todo o processo: os Vice-Presidentes do IPCC, Ko Barret, Thelma Krug e Youba Sokona; os Co-Presidentes dos Grupos de Trabalho (GT) e da Força-Tarefa de Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa (TFI) Valérie Masson-Delmotte, Panmao Zhai, Hans-Otto Pörtner, Debra Roberts, Priyadarshi R. Shukla, Jim Skea, Eduardo Calvo Buendía e Kiyoto Tanabe; os Vice-Presidentes do GT Edvin Aldrian, Fatima Driouech, Jan Fuglestvedt, Muhammad Tariq, Carolina Vera, Noureddine Yassaa, Andreas Fischlin, Joy Jacqueline Pereira, Sergey Semenov, Pius Yanda, Taha M, Zatari, Amjad Abdulla, Carlo Carraro, Diriba Korecha Dadi, Nagmeldin G.E. Mahmoud, Ramón Pichs-Madruga, Andy Reisinger e Diana Ürge-Vorsatz. Os Vice-Presidentes do IPCC e os Co-Presidentes dos GTs também atuaram como membros da CWT e agradecemos por suas contribuições.

Gostaríamos de agradecer ao Secretariado do IPCC por sua orientação e apoio ao SYR na elaboração, divulgação e publicação do Relatório: a Secretária Adjunta Emira Fida, Mudathir Abdallah, Jesbin Baidya, Laura Biagioni, Oksana Ekzarkho, Judith Ewa, Joëlle Fernandez, Emelie Larrode, Jennifer Lew Schneider, Andrej Mahecic, Nina Peeva, Mxolisi Shongwe, Melissa Walsh e Werani Zabula. O seu apoio ao sucesso do SYR foi realmente excepcional durante todo o processo.

Nossos agradecimentos a José Romero, Chefe da Unidade de Suporte Técnico do SYR (SYR TSU), e a Jinmi Kim, Diretor de Administração, e aos membros da TSU do SYR, Arlene Birt, Meeyoung Ha, Erik Haites, Lance Ignon, Yonghun Jung, Dan Jezreel Orendain, Robert Stavins, Semin Park e Youngin Park, pelo trabalho árduo para facilitar o desenvolvimento e a produção do SYR, com profundo comprometimento e dedicação para garantir um SYR excepcional. Nossos agradecimentos também a Woochong Um e sua equipe no Banco Asiático de Desenvolvimento pela facilitação da operação da TSU do SYR.

Agradecemos o entusiasmo, a dedicação e as contribuições profissionais dos membros da TSU do GT Sarah Connors, Clotilde Péan e Anna Pirani do GT I, Marlies Craig, Katja Mintenbeck, Elvira Poloczanska e Melinda Tignor do GT II e Roger Fradera, Minal Pathak, Raphael Slade, Shreya Some e Geninha Gabao Lisboa do GT III, trabalhando em equipe com a TSU do SYR, tendo contribuído para o sucesso da sessão.

Somos gratos aos governos membros do IPCC que gentilmente sediaram a reunião de escopo do SYR, Reunião da CWT e a 58ª Sessão do IPCC: Singapura, Irlanda e Suíça, respectivamente. Expressamos nossos agradecimentos aos governos membros do IPCC, à OMM, ao PNUMA e

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 11

à UNFCCC por suas contribuições ao Fundo Fiduciário, que apoiou vários elementos de despesas. Gostaríamos de agradecer particularmente à Administração Meteorológica da Coreia, República da Coreia, pelo seu generoso apoio financeiro à TSU do SYR. Reconhecemos o apoio das organizações-mãe do IPCC, o PNUMA e a OMM, especialmente a OMM, por sediar o Secretariado do IPCC. Por fim, gostaríamos de expressar nossa profunda gratidão à UNFCCC por sua cooperação em vários estágios deste empreendimento e pelo destaque dado ao nosso trabalho em vários fóruns.



Hoesung Lee
Presidente do IPCC



Abdalah Mokssit
Secretário do IPCC

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 13

Índice

Início

Apresentação **07**

Prefácio **09**

SFP

Sumário para Formuladores de Políticas **17**

Introdução **19**

A. Situação Atual e Tendências 20

Caixa SPM.1 | O uso de cenários e trajetórias modeladas no Relatório Síntese AR6 25

B. Futuras Mudanças do Clima, Riscos e Respostas de Longo Prazo 28

C. Respostas a Curto Prazo 41

Seções

Mudança do Clima 2023 ..... **53**

Seção 1: Introdução **55**

Seção 2: Situação Atual e Tendências **59**

2.1. Mudanças Observadas, Impactos e Atribuições 60

2.1.1. Aquecimento Observado e suas Causas 60

2.1.2. Mudanças e Impactos do Sistema Climático Observados até o Momento 64

2.2. Respostas Adotadas até o Momento 70

2.2.1 Definição de Políticas Globais 70

2.2.2. Ações de Mitigação até o Momento 70

2.2.3. Ações de Adaptação até o Momento 73

2.3. Ações e Políticas Atuais de Mitigação e Adaptação não são Suficientes 74

2.3.1. A Lacuna entre Políticas de Mitigação, Compromissos e Trajetórias que Limitam o Aquecimento a 1,5 ou Abaixo de 2ºC 75

Caixa de Seção Transversal

1. Entendendo as Emissões Líquidas Zero de CO_2 e as Emissões Líquidas Zero de GEE **78**

2.3.2. Lacunas e Barreiras para Adaptação 79

2.3.3. Falta de Financiamento como Barreira para a Ação Climática 80

Caixa de Seção Transversal

2. Cenários, Níveis de Aquecimento Global e Riscos **81**

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 14

Seção 3: Perspectivas de Clima e de Desenvolvimento no Longo Prazo 85

3.1. Mudança do Clima no Longo Prazo, Impactos e Riscos Relacionados 86

3.1.1. Mudança do Clima no Longo Prazo 86

3.1.2. Impactos e Riscos Relacionados 89

3.1.3. Probabilidade e Riscos de Mudanças Abruptas e Irreversíveis 95

3.2. Opções e Limites de Adaptação no Longo Prazo 96

3.3. Trajetórias de Mitigação 100

3.3.1. Orçamento de Carbono Remanescente 100

3.3.2. Emissões Líquidas Zero: Cronogramas e Implicações 103

3.3.3. Contribuições Setoriais para a Mitigação 105

3.3.4. Trajetórias sendo Ultrapassadas: Aumento dos Riscos e Outras Implicações 106

3.4. Interações no Longo Prazo entre Adaptação, Mitigação e Desenvolvimento Sustentável 106

3.4.1. Sinergias e trade-offs, Custos e Benefícios 106

3.4.2. Avançando a Ação Climática Integrada para o Desenvolvimento Sustentável 107

Seção 4: Respostas no Curto Prazo para um Clima em Mudança 109

4.1. Temporalidade e Urgência da Ação Climática 110

4.2. Benefícios do Fortalecimento da Ação no Curto Prazo 113

4.3. Riscos no Curto Prazo 116

4.4. Equidade e Inclusão na Ação de Mudança do Clima 119

4.5. Ações de Mitigação e Adaptação no Curto Prazo 120

4.5.1. Sistemas de Energia 122

4.5.2. Indústria 123

4.5.3. Cidades, Assentamentos e Infraestrutura 123

4.5.4. Terra, Oceano, Alimentos e Água 124

4.5.5. Saúde e Nutrição 125

4.5.6. Sociedade, Meios de Subsistência e Economias 125

4.6. Cobenefícios da Adaptação e Mitigação para Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 126

4.7. Governança e Política para Ações em Mudança do Clima no Curto Prazo 128

4.8. Fortalecendo a Resposta: Financiamento, Cooperação Internacional e Tecnologia 129

4.8.1. Financiamento para Ações de Mitigação e Adaptação 129

4.8.2. Cooperação e Coordenação Internacional 131

4.8.3. Inovação, Adoção, Difusão e Transferência Tecnológica 133

4.9. Integração de Ações de Curto Prazo entre Setores e Sistemas 133

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 15

Anexos

Anexos 135

I. Glossário 137

II. Acrônimos, Símbolos Químicos e Unidades Científicas 149

III. Contribuintes 153

IV. Revisores Especialistas AR6 SYR 161

V. Lista de Publicações do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima 177

As referências do material contido neste relatório são apresentadas entre chaves {} ao final de cada parágrafo.

No Sumário para Formuladores de Políticas, as referências remetem aos números das seções, figuras, tabelas e caixas na Introdução e Tópicos subjacentes a este Relatório Síntese.

Na Introdução e nas Seções do relatório mais amplo, as referências remetem às contribuições dos Grupos de Trabalho I, II e III (WGI, WGII, WGIII) para o Sexto Relatório de Avaliação e outros Relatórios do IPCC (em itálico e entre chaves), ou para outras seções do próprio Relatório Síntese (entre parênteses).

As seguintes abreviaturas foram utilizadas:
SPM: Sumário para Formuladores de Políticas
TS: Resumo Técnico
ES: Resumo Executivo de um capítulo

Os números denotam capítulos e seções específicas de um relatório.

Outros relatórios do IPCC citados neste Relatório Síntese:
SR1.5: Aquecimento Global de 1,5°C
SRCCL: Mudanças do Clima e Terra
SROCC: O Oceano e a Criosfera em um Clima em Mudança

Mudança do Clima 2023
Sumário para Formuladores de Políticas

Este Sumário para Formuladores de Políticas deve ser citado como:
IPCC, 2023: Sumário para Formuladores de Políticas. Em: *Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima* [Equipe Principal de Redação, H Lee e J. Romero (eds.)]. IPCC, Genebra, Suíça, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 19

Introdução

Este Relatório Síntese (SYR) do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (AR6) resume o estado dos conhecimentos sobre mudança do clima, seus impactos e riscos generalizados, e a mitigação e adaptação à mudança do clima. Ele integra as principais conclusões do Sexto Relatório de Avaliação (AR6) com base nas contribuições dos três Grupos de Trabalho[1] e dos três Relatórios Especiais[2]. O resumo para Formuladores de Políticas (SPM) está estruturado em três partes: SPM.A Situação Atual e Tendências, SPM.B Mudança do Clima Futura, Riscos e Respostas de Longo Prazo, e SPM.C Respostas a Curto Prazo[3].

Este relatório reconhece a interdependência do clima, dos ecossistemas e da biodiversidade e das sociedades humanas; o valor de diversas formas de conhecimento; e as estreitas ligações entre a adaptação à mudança do clima, a mitigação, a saúde dos ecossistemas, o bem-estar humano e o desenvolvimento sustentável, refletindo a crescente diversidade de atores envolvidos na ação climática.

Com base no entendimento científico, as principais descobertas podem ser formuladas como declarações de fatos ou associadas a um nível de confiança avaliado usando a linguagem calibrada do IPCC[4].

1 As três contribuições do Grupo de Trabalho ao AR6 são: AR6 Mudança do Clima 2021: Base das Ciências Físicas; AR6 Mudança do Clima 2022: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade; e AR6 Mudança do Clima 2022: Mitigação da Mudança do Clima. Suas avaliações abrangem a literatura científica aceita para publicação, respectivamente, até 31 de janeiro de 2021, 1º de setembro de 2021 e 11 de outubro de 2021.

2 Os três Relatórios Especiais são: Aquecimento Global de 1,5ºC (2018): um Relatório Especial do IPCC sobre os impactos do aquecimento global de 1,5ºC acima dos níveis pré-industriais e as trajetórias de emissões globais de gases de efeito estufa relacionados, no contexto do fortalecimento da resposta global à ameaça da mudança do clima, do desenvolvimento sustentável e dos esforços para erradicar a pobreza (SR1.5); Mudança do Clima e Terra (2019): um Relatório Especial do IPCC sobre mudança do clima, desertificação, degradação do solo, manejo sustentável do solo, segurança alimentar e fluxos de gases de efeito estufa em ecossistemas terrestres (SRCCL); e O Oceano e a Criosfera de um Clima em Mudança (2019) (SROCC). Os Relatórios Especiais abrangem a literatura científica aceita para publicação, respectivamente, até 15 de maio de 2018, 7 de abril de 2019 e 15 de maio de 2019.

3 Neste relatório, o curto prazo é definido como o período até 2040. O longo prazo é definido como o período após 2040.

4 Cada descoberta é fundamentada em uma avaliação de evidências e acordos subjacentes. A linguagem calibrada do IPCC utiliza cinco qualificadores para expressar um nível de confiança: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, escrito em itálico, por exemplo, *confiança média*. Os seguintes termos são usados para indicar a probabilidade avaliada de uma consequência ou resultado: virtualmente certo 99-100% de probabilidade, muito provável 90-100%, provável 66-100%, mais provável do que improvável > 50-100%, tanto provável quanto improvável 33-66%, improvável 0-33%, muito improvável 0-10%, excepcionalmente improvável 0-1%. Termos adicionais (extremamente provável 95-100%; e extremamente improvável 0-5%) também são usados quando apropriado. A probabilidade avaliada é indicada em itálico, por exemplo, *muito provável*. Isto é consistente com o AR5 e os outros Relatórios AR6.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 20

A. Situação Atual e Tendências

Aquecimento Observado e suas Causas

A.1 As atividades humanas, principalmente através das emissões de gases de efeito estufa, inequivocamente causaram o aquecimento global, com a temperatura da superfície global atingindo um valor 1,1°C mais alto entre 2011-2020 do que no período de 1850-1900. As emissões globais de gases de efeito estufa continuaram a aumentar, com contribuições históricas e contínuas desiguais decorrentes do uso insustentável de energia, do uso da terra e da mudança no uso da terra, dos estilos de vida e dos padrões de consumo e produção entre regiões, entre países e dentro deles, e entre indivíduos *(alta confiança). {2.1, Figura 2.1, Figura 2.2}*

A.1.1 A temperatura da superfície global foi 1,09 [0,95 a 1,20]°C[5] mais alta em 2011-2020 do que em 1850-1900[6], com aumentos maiores sobre os continentes (1,59 [1,34 a 1,83]°C) do que sobre o oceano (0,88 [0,68 a 1,01]°C). A temperatura da superfície global nas duas primeiras décadas do século 21 (2001-2020) foi 0,99 [0,84 a 1,10]°C mais alta que em 1850-1900. A temperatura da superfície global aumentou mais rapidamente desde 1970 do que comparado a qualquer outro período de 50 anos, pelo menos nos últimos 2000 anos *(alta confiança). {2.1.1, Figura 2.1}*

A.1.2 A faixa *provável* de aumento total da temperatura da superfície global causada pelo homem de 1850-1900 a 2010-2019[7] é de 0,8°C a 1,3°C, sendo a melhor estimativa de 1,07°C. Durante esse período, é *provável* que gases de efeito estufa (GEEs) misturados de forma homogênea tenham contribuído para um aquecimento de 1,0°C a 2,0°C[8], outros fatores humanos (principalmente aerossóis) contribuíram para um resfriamento de 0,0°C a 0,8°C e fatores naturais (solares e vulcânicos) mudaram a temperatura da superfície global de -0,1°C a +0,1°C e a variabilidade interna mudou de -0,2°C a +0,2°C. *{2.1.1, Figura 2.1}*

A.1.3 Os aumentos observados em concentrações de GEE misturados de forma homogênea desde cerca de 1750 são inequivocamente causados por emissões de GEE de atividades humanas durante esse período. As emissões líquidas acumuladas históricas de CO_2 de 1850 a 2019 foram de 2.400 ± 240 $GtCO_2$ das quais mais da metade (58%) ocorreram entre 1850 e 1989 e cerca de 42% ocorreram entre 1990 e 2019 (*alta confiança).* Em 2019, as concentrações atmosféricas de CO_2 (410 partes por milhão) foram mais altas do que em qualquer período em pelo menos 2 milhões de anos (*alta confiança),* e as concentrações de metano (1866 partes por bilhão) e óxido nitroso (332 partes por bilhão) foram mais altas do que em qualquer momento em pelo menos 800.000 anos *(confiança muito alta). {2.1.1, Figura 2.1}*

A.1.4 As emissões líquidas globais de GEE antropogênicas foram estimadas em 59 ± 6,6 $GtCO_2$-eq[9] em 2019, cerca de 12% (6,5 $GtCO_2$-eq) a mais do que em 2010 e 54% (21 $GtCO_2$-eq) a mais do que em 1990, com a maior participação e crescimento nas emissões brutas de GEE ocorrendo no CO_2 da combustão de combustíveis fósseis e processos industriais (CO_2-FFI) seguido pelo metano, enquanto o maior crescimento relativo ocorreu nos gases fluorados (gases F), a partir de níveis baixos em 1990. A média anual das emissões de GEE durante 2010-2019 foi mais alta do que em qualquer década anteriormente registrada, enquanto a taxa de crescimento entre 2010 e 2019 (1,3% ano^{-1}) foi menor do que entre 2000 e 2009 (2,1% ano^{-1}). Em 2019, aproximadamente 79% das emissões globais de GEE vieram dos setores de energia, indústria, transporte e edificações combinados e 22%[10] da agricultura, silvicultura e outros usos da terra (AFOLU).

5 As faixas fornecidas ao longo do SPM representam faixas muito prováveis (faixa de 5 a 95%), a menos que indicado de outra forma.

6 O aumento estimado na temperatura da superfície global desde o AR5 é principalmente devido ao aquecimento posterior desde 2003-2012 (0,19 [0,16 a 0,22] °C). Além disso, avanços metodológicos e novos conjuntos de dados proporcionaram uma representação espacial mais completa das mudanças na temperatura da superfície, inclusive no Ártico. Estas e outras melhorias também aumentaram a estimativa da temperatura da superfície global em aproximadamente 0,1°C, mas este aumento não representa um aquecimento físico adicional desde o AR5.

7 A distinção do período com o A.1.1 surge porque os estudos de atribuição consideram este período ligeiramente anterior. O aquecimento observado para 2010-2019 é de 1,06 [0,88 a 1,21]°C.

8 As contribuições das emissões para o aquecimento de 2010-2019 em relação a 1850-1900 avaliadas a partir de estudos de forçante radiativa são: CO_2 0,8 [0,5 a 1,2]°C; metano 0,5 [0,3 a 0,8]°C; óxido nitroso 0,1 [0,0 a 0,2]°C e gases fluorados 0,1 [0,0 a 0,2]°C. {2.1.1}

9 As métricas de emissão de GEE são usadas para expressar as emissões de diferentes gases de efeito estufa em uma unidade comum. As emissões agregadas de GEE neste relatório são declaradas em CO_2 equivalente (CO_2-eq) utilizando o Potencial de Aquecimento Global com um horizonte temporal de 100 anos (GWP100) com valores baseados na contribuição do Grupo de Trabalho I para o AR6. Os relatórios AR6 do WGI e WGIII contêm valores de métrica de emissão atualizados, avaliações de diferentes métricas com relação aos objetivos de mitigação e avaliam novas abordagens para agregar gases. A escolha da métrica depende do objetivo da análise e todas as métricas de emissão de GEE têm limitações e incertezas, visto que simplificam a complexidade do sistema climático físico e sua resposta às emissões de GEE passadas e futuras. {2.1.1}

10 Os níveis de emissão de GEE são arredondados para dois dígitos significativos; como consequência, podem ocorrer pequenas diferenças nas somas devido ao arredondamento. {2.1.1}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 21

As reduções de emissões de CO_2-FFI devido a melhorias na intensidade energética do PIB e na intensidade de carbono da energia foram menores do que os aumentos das emissões decorrentes do aumento dos níveis de atividade global na indústria, no fornecimento de energia, no transporte, na agricultura e nos edifícios. *(alta confiança) {2.1.1}*

A.1.5 As contribuições históricas das emissões de CO_2 variam substancialmente entre as regiões em termos de magnitude total, mas também em termos de contribuições para CO_2-FFI e emissões líquidas de CO_2 do uso do solo, da mudança no uso da terra e da silvicultura (CO_2-LULUCF). Em 2019, cerca de 35% da população mundial vive em países que emitem mais de 9 tCO_2-eq per capita[11] (excluindo CO_2-LULUCF) enquanto 41% vive em países que emitem menos de 3 tCO_2-eq per capita; destes, uma parcela substancial carece de acesso a serviços modernos de energia. Os Países Menos Desenvolvidos (LDCs) e os Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (SIDS) têm emissões per capita (1,7 tCO_2-eq e 4,6 tCO_2-eq, respectivamente) muito inferiores à média global (6,9 tCO_2-eq), excluindo CO_2-LULUCF. Os 10% dos domicílios com as maiores emissões per capita contribuem com 34-45% das emissões domésticas globais de GEE baseadas no consumo, enquanto os 50% mais pobres contribuem com 13-15%. *(alta confiança) {2.1.1, Figura 2.2}*

Mudanças e Impactos Observados

A.2 Ocorreram mudanças generalizadas e rápidas na atmosfera, oceano, criosfera e biosfera. A mudança do clima causada pelo homem já está afetando muitos extremos climáticos e meteorológicos em todas as regiões do mundo. Isto vem resultando em impactos adversos generalizados, e perdas e danos relacionados, à natureza e às pessoas *(alta confiança).* Comunidades vulneráveis que menos contribuíram historicamente para a mudança atual do clima são afetadas de forma desproporcional *(alta confiança). {2.1, Tabela 2.1, Figura 2.2, Figura 2.3} (Figura SPM.1)*

A.2.1 É inequívoco que a influência humana aqueceu a atmosfera, o oceano e a terra. O nível médio global do mar aumentou em 0,20 [0,15 a 0,25] m entre 1901 e 2018. A taxa média de elevação do nível do mar foi de 1,3 [0,6 a 2,1] mm ano^{-1} entre 1901 e 1971, aumentando para 1,9 [0,8 a 2,9] mm ano^{-1} entre 1971 e 2006, e aumentando ainda mais para 3,7 [3,2 a 4,2] mm ano^{-1} entre 2006 e 2018 (*alta confiança).* A influência humana foi *muito provavelmente* o fator principal destes aumentos desde pelo menos 1971. As evidências das mudanças observadas em extremos como ondas de calor, precipitações intensas, secas e ciclones tropicais e, em particular, sua atribuição à influência humana, se fortaleceram ainda mais desde o AR5. A influência humana *provavelmente* aumentou a probabilidade de eventos extremos compostos desde a década de 1950, incluindo aumentos na frequência de ondas de calor e secas simultâneas *(alta confiança). {2.1.2, Tabela 2.1, Figura 2.3, Figura 3.4} (Figura SPM.1)*

A.2.2 Aproximadamente 3,3 a 3,6 bilhões de pessoas vivem em contextos altamente vulneráveis à mudança do clima. A vulnerabilidade humana e dos ecossistemas são interdependentes. Regiões e pessoas com consideráveis restrições ao desenvolvimento têm alta vulnerabilidade às ameaças climáticas. O aumento de eventos meteorológicos e climáticos extremos expôs milhões de pessoas à insegurança alimentar aguda[12] e reduziu a segurança hídrica, com os maiores impactos adversos observados em muitos locais e/ou comunidades na África, Ásia, América Central e do Sul, LDCs, Pequenas Ilhas e Ártico, e globalmente para os povos indígenas, pequenos produtores de alimentos e famílias de baixa renda. Entre 2010 e 2020, a mortalidade humana causada por enchentes, secas e tempestades foi 15 vezes maior em regiões altamente vulneráveis, em comparação com regiões de vulnerabilidade muito baixa *(alta confiança). {2.1.2,4.4} (Figura SPM.1)*

A.2.3 A mudança do clima tem causado danos substanciais e, cada vez mais, perdas irreversíveis em ecossistemas terrestres, de água doce, criosféricos e costeiros e de oceano aberto (*alta confiança).* Centenas de perdas locais de espécies foram causadas por aumentos na magnitude de extremos de calor (*alta confiança)* com eventos de mortalidade em massa registrados na terra e no oceano *(confiança muito alta).* Os impactos em alguns ecossistemas estão se aproximando da irreversibilidade, tais como os impactos das mudanças hidrológicas resultantes do recuo das geleiras, ou as mudanças em alguns ecossistemas de montanha (*confiança média*) e Ártico impulsionados pelo degelo do *permafrost* (*alta confiança). {2.1.2, Figura 2.3} (Figura SPM.1)*

A.2.4 A mudança do clima reduziu a segurança alimentar e afetou a segurança hídrica, dificultando os esforços para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável *(alta confiança).* Embora a produtividade agrícola geral tenha aumentado, a mudança do clima desacelerou esse crescimento globalmente nos últimos 50 anos *(confiança média),* com impactos negativos relacionados principalmente em regiões de latitude média e baixa, mas com impactos positivos em algumas regiões de latitude alta (*alta confiança).* O aquecimento e a acidificação dos oceanos afetaram negativamente a produção de alimentos da aquicultura e da pesca de crustáceos e moluscos

[11] Emissões territoriais.

[12] A insegurança alimentar aguda pode ocorrer a qualquer momento com uma gravidade que ameaça vidas, meios de subsistência ou ambos, independentemente das causas, contexto ou duração, como resultado de choques que arriscam determinantes da segurança alimentar e nutrição, sendo usada para avaliar a necessidade de ação humanitária. {2.1}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 22

em algumas regiões oceânicas (*alta confiança).* Atualmente, cerca de metade da população mundial enfrenta grave escassez de água durante pelo menos parte do ano devido a uma combinação de fatores climáticos e não climáticos *(confiança média). {2.1.2, Figura 2.3} (Figura SPM.1)*

A.2.5 Em todas as regiões, o aumento dos eventos de calor extremo resultou em mortalidade e morbidade humana (*confiança muito alta).* A ocorrência de doenças relacionadas ao clima transmitida por alimentos e água *(confiança muito alta)* e a incidência de doenças transmitidas por vetores (*confiança alta*) aumentaram. Nas regiões avaliadas, alguns problemas de saúde mental estão associados ao aumento da temperatura (*alta confiança*), traumas de eventos extremos (*confiança muito alta*) e perda de meios de subsistência e cultura (*alta confiança).* Os extremos climáticos e meteorológicos estão cada vez mais provocando deslocamentos na África, Ásia, América do Norte (*alta confiança*) e América Central e do Sul (*confiança média*), com pequenos estados insulares no Caribe e Pacífico Sul sendo afetados desproporcionalmente em relação ao tamanho de sua pequena população (*alta confiança*). {2.1.2, Figura 2.3} (Figura SPM.1)

A.2.6 A mudança do clima tem causado impactos adversos generalizados e perdas e danos relacionados[13] à natureza e às pessoas, distribuídos de forma desigual entre sistemas, regiões e setores. Os danos econômicos da mudança do clima foram detectados em setores expostos ao clima, como agricultura, silvicultura, pesca, energia e turismo. Os meios de subsistência individuais foram afetados, por exemplo, pela destruição de habitações e infraestruturas e pela perda de propriedade e de renda, saúde humana e segurança alimentar, com efeitos adversos relacionados ao gênero e equidade social. (*alta confiança) {2.1.2} (Figura SPM.1)*

A.2.7 Nas áreas urbanas, a mudança do clima observada tem causado impactos adversos na saúde humana, nos meios de subsistência e na infraestrutura essencial. Temperaturas elevadas extremas se intensificaram nas cidades. A infraestrutura urbana, incluindo sistemas de transporte, água, saneamento e energia, foi comprometida por eventos extremos e de início lento[14], resultando em perdas econômicas, interrupções de serviços e impactos negativos no bem-estar. Os impactos adversos observados estão concentrados entre os residentes urbanos econômica e socialmente marginalizados. (*alta confiança) {2.1.2}*

[13] Neste relatório, o termo "perdas e danos" se refere a impactos adversos observados e/ou riscos projetados, podendo ser econômico e/ou não econômico. (Consulte o Anexo I: Glossário).

[14] Eventos de início lento são descritos entre os fatores de impacto climático do AR6 do WGI e se referem aos riscos e impactos associados, por exemplo, ao aumento dos meios de temperatura, desertificação, diminuição da precipitação, perda de biodiversidade, degradação do solo e da floresta, recuo glacial e impactos relacionados, acidificação dos oceanos, elevação do nível do mar e salinização. *{2.1.2}*

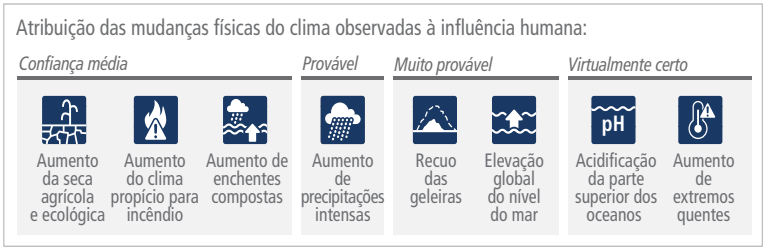
Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 23

Os impactos adversos da mudança do clima causada pelo homem continuarão a se intensificar

a) **Impactos generalizados e substanciais observados e perdas e danos relacionados, atribuídos à mudança do clima.**



b) **Os impactos são causados por mudanças em múltiplas condições climáticas físicas, que são cada vez mais atribuídas à influência humana**



c) **Até que ponto as gerações atuais e futuras viverão em um mundo mais quente e diferente depende das escolhas feitas agora e no curto prazo**

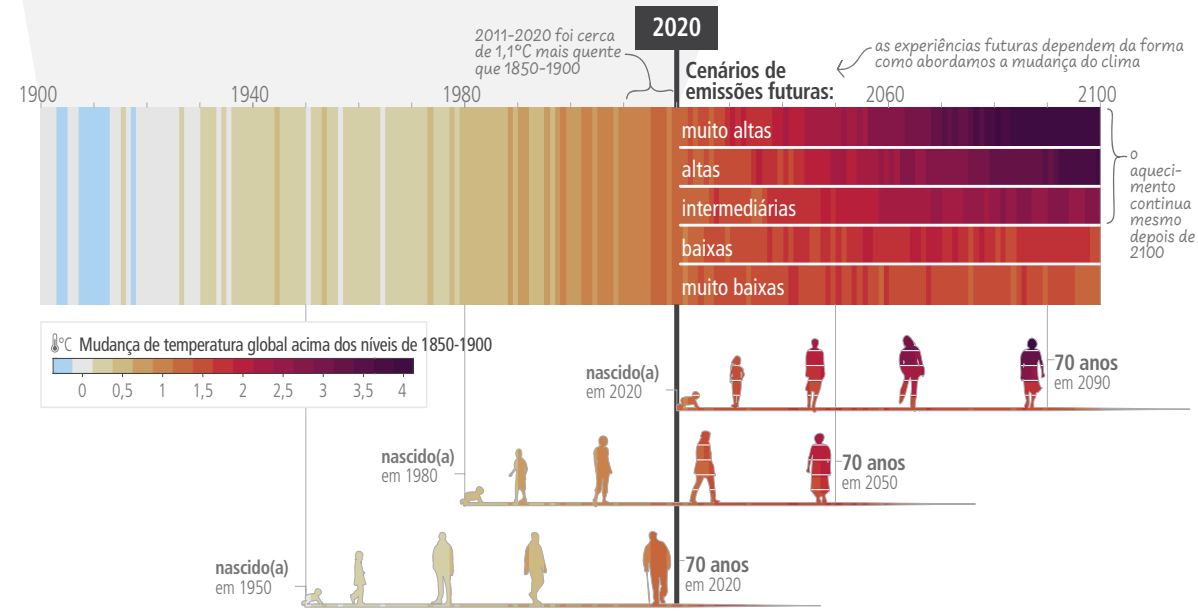


Figura SPM.1: (a) A mudança do clima já causou impactos generalizados e perdas e danos relacionados aos sistemas humanos e alterou os ecossistemas terrestres, de água doce e oceânicos em todo o mundo. A disponibilidade física de água inclui o equilíbrio da água disponível de várias fontes, incluindo água subterrânea, qualidade da água e demanda de água. As avaliações globais de saúde mental e de deslocamento refletem apenas as regiões avaliadas. Os níveis de confiança refletem a avaliação da atribuição do impacto observado à mudança do clima. **(b)** Os impactos observados estão ligados às mudanças físicas do clima, incluindo muitas que foram atribuídas à influência humana, tais como os fatores de impacto climático selecionados mostrados. Os níveis de confiança e probabilidade refletem a avaliação da atribuição do fator de impacto climático observado à influência humana. **(c)** Mudanças observadas (1900-2020) e projetadas (2021-2100) na temperatura da superfície global (em relação a 1850-1900), que estão ligadas a mudanças nas condições e impactos climáticos, ilustram como o clima já mudou e mudará ao longo do período de vida de três gerações representativas (nascidas em 1950, 1980 e 2020). As projeções futuras (2021-2100) de mudanças na temperatura da superfície global são mostradas para cenários de emissões de GEE muito

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 24

baixas (SSP1-1.9), baixas (SSP1-2.6), intermediárias (SSP2-4.5), altas (SSP3-7.0) e muito altas (SSP5-8.5). As mudanças anuais nas temperaturas da superfície global são apresentadas como 'faixas climáticas', com projeções futuras que mostram as tendências de longo prazo causadas pelo homem e a modulação contínua pela variabilidade natural (representada utilizando níveis observados de variabilidade natural passada). As cores nos ícones geracionais correspondem às faixas de temperatura da superfície global para cada ano, com segmentos nos ícones futuros diferenciando possíveis vivências futuras. *{2.1, 2.1.2, Figura 2.1, Tabela 2.1, Figura 2.3, Caixa de Seção Transversal.2, 3.1, Figura 3.3, 4.1, 4.3} (Caixa SPM.1)*

Progresso Atual em Adaptação e Lacunas e Desafios

A.3 O planejamento e a implementação da adaptação progrediram em todos os setores e regiões, com benefícios documentados e eficácia variável. Apesar dos progressos, há lacunas na adaptação que continuarão crescendo às taxas atuais de implementação. Limites rígidos e flexíveis da adaptação foram alcançados em alguns ecossistemas e regiões. Há uma má adaptação ocorrendo em alguns setores e regiões. Os atuais fluxos financeiros globais para adaptação são insuficientes e restringem a implementação de opções de adaptação, especialmente em países em desenvolvimento *(alta confiança). {2.2, 2.3}*

A.3.1 O progresso no planejamento e implementação da adaptação foi observado em todos os setores e regiões, gerando múltiplos benefícios *(confiança muito alta).* A crescente conscientização pública e política dos impactos e riscos climáticos fez com que pelo menos 170 países e muitas cidades incluíssem a adaptação em suas políticas climáticas e processos de planejamento (*alta confiança). {2.2.3}*

A.3.2 A eficácia[15] da adaptação na redução dos riscos climáticos[16] está documentada para contextos, setores e regiões específicos (*alta confiança).* Exemplos de opções eficazes de adaptação incluem: melhorias de cultivares, gestão e armazenamento de água nas fazendas agrícolas, conservação da umidade do solo, irrigação, agroflorestas, adaptação baseada na comunidade, diversificação agrícola a nível da fazenda e da paisagem, abordagens sustentáveis de manejo do solo, uso de princípios e práticas agroecológicos e outras abordagens que trabalham com processos naturais (*alta confiança).* Abordagens de adaptação baseada em ecossistemas[17], como ecologia urbana, restauração de zonas úmidas e ecossistemas florestais a montante, têm sido eficazes na redução dos riscos de enchentes e calor urbano (*alta confiança).* Combinações de medidas não estruturais, como sistemas de alerta precoce, e medidas estruturais, como diques, reduziram a perda de vidas em caso de enchentes *(confiança média).* As opções de adaptação, como gestão de riscos de desastres, sistemas de alerta precoce, serviços climáticos e redes de segurança social, têm ampla aplicabilidade em múltiplos setores (*alta confiança). {2.2.3}*

A.3.3 A maioria das respostas de adaptação observadas são fragmentadas, incrementais[18], específicas para um setor e distribuídas de forma desigual entre as regiões. Apesar dos progressos, há lacunas de adaptação entre setores e regiões que continuarão crescendo com os atuais níveis de implementação, com as maiores lacunas de adaptação entre os grupos de baixa renda. (*alta confiança) {2.3.2}*

A.3.4 Há evidências crescentes de má adaptação em vários setores e regiões. A má adaptação afeta especialmente os grupos marginalizados e vulneráveis de forma adversa. (*alta confiança) {2.3.2}*

A.3.5 Limites flexíveis de adaptação estão sendo enfrentados por pequenos agricultores e famílias ao longo de algumas áreas costeiras de baixa altitude (*confiança média*) resultantes de restrições financeiras, de governança, institucionais e políticas *(alta confiança).* Alguns ecossistemas tropicais, costeiros, polares e montanhosos atingiram limites rígidos de adaptação (*alta confiança*). A adaptação não impede todas as perdas e danos, mesmo com uma adaptação eficaz e antes de atingir limites flexíveis e rígidos. (*alta confiança). {2.3.2}*

A.3. 6 As principais barreiras à adaptação são recursos limitados, falta de envolvimento do setor privado e dos cidadãos, mobilização insuficiente de financiamento (inclusive para pesquisa), baixa alfabetização climática, falta de compromisso político, pesquisa limitada e/ou lenta e baixa assimilação da ciência da adaptação e baixo senso de urgência. Há disparidades crescentes entre os custos estimados de adaptação e o financiamento destinado à adaptação (*alta confiança).* O financiamento da adaptação advém predominantemente de fontes públicas, e uma pequena proporção do financiamento climático global rastreado foi direcionado para adaptação e uma esmagadora maioria para mitigação *(confiança muito alta).* Embora o financiamento climático global rastreado tenha mostrado uma tendência ascendente desde o AR5, os atuais fluxos financeiros globais para adaptação, incluindo de fontes de financiamento público e privado, são insuficientes e restringem a implementação de opções de adaptação, especialmente em países em desenvolvimento (*alta confiança).* Os impactos

[15] Eficácia refere-se aqui à medida que uma opção de adaptação é antecipada ou observada para a redução do risco relacionado ao clima. {2.2.3}

[16] Consulte o Anexo I: Glossário. {2.2.3}

[17] A Adaptação Baseada em Ecossistemas (EbA) é reconhecida internacionalmente pela Convenção sobre Diversidade Biológica (CBD14/5). Um conceito relacionado é o de Soluções Baseadas na Natureza (NbS), consulte o Anexo I: Glossário.

[18] As adaptações incrementais à mudança do clima são entendidas como extensões de ações e comportamentos que já reduzem as perdas ou potencializam os benefícios das variações naturais em eventos meteorológicos/climáticos extremos. {2.3.2}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 25

climáticos adversos podem reduzir a disponibilidade de recursos financeiros, incorrendo em perdas e danos e impedindo o crescimento econômico nacional, dessa forma aumentando ainda mais as restrições financeiras para adaptação, em particular, para países em desenvolvimento e menos desenvolvidos *(confiança média). {2.3.2,2.3.3}*

Caixa SPM.1 O uso de cenários e trajetórias modeladas no Relatório Síntese AR6

Cenários e trajetórias modeladas[19] são usados para explorar emissões futuras, mudança do clima, impactos e riscos relacionados, e possíveis estratégias de mitigação e adaptação, sendo baseados em uma série de premissas, incluindo variáveis socioeconômicas e opções de mitigação. Estas são projeções quantitativas e não são previsões nem prognósticos. As trajetórias de emissões globais modeladas, inclusive aquelas baseadas em abordagens econômicas, contêm premissas e resultados diferenciados regionalmente e devem ser avaliados com o reconhecimento cuidadoso dessas premissas. A maioria não adota premissas explícitas sobre equidade global, justiça ambiental ou distribuição de renda intrarregional. O IPCC é neutro em relação às premissas subjacentes aos cenários da literatura avaliados neste relatório, que não abrangem todos os futuros possíveis.[20] *{Caixa de Seção Transversal.2}*

O WGI avaliou a resposta climática a cinco cenários ilustrativos baseados em Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas (SSPs)[21] que abrangem a gama de possíveis desenvolvimentos futuros de fatores antropogênicos da mudança do clima, encontrados na literatura. Cenários de emissões de GEE altas e muito altas (SSP3-7.0 e SSP5-8.5[22]) têm emissões de CO_2 que aproximadamente dobram em relação aos níveis atuais até 2100 e 2050, respectivamente. O cenário de emissões de GEE intermediárias (SSP2-4.5) tem emissões de CO_2 que permanecem em torno dos níveis atuais até meados do século. Os cenários de emissões muito baixas e baixas de GEE (SSP1-1.9 e SSP1-2.6) têm emissões líquidas de CO_2 diminuindo para zero por volta de 2050 e 2070, respectivamente, seguidos por níveis variáveis de emissões líquidas negativas de CO_2. Além disso, foram usadas Trajetórias Representativas de Concentração (RCPs)[23] pelo WGI e WGII para avaliar as mudanças, impactos e riscos climáticos regionais. No WGIII, foram avaliadas inúmeras trajetórias de emissões globais modeladas, das quais 1202 trajetórias foram categorizadas com base em seu aquecimento global avaliado ao longo do século XXI; as categorias variam de trajetórias que limitam o aquecimento a 1,5ºC , com mais de 50% de probabilidade (observada em >50% neste relatório) sem ou com ultrapassagem limitada (C1), a trajetórias que excedem 4ºC (C8). *{Caixa de Seção Transversal.2} (Caixa SPM.1, Tabela 1*)

Os níveis de aquecimento global (GWLs) relativos a 1850-1900 são usados para integrar a avaliação da mudança do clima e os impactos e riscos relacionados, uma vez que os padrões de mudanças para muitas variáveis em um determinado GWL são comuns a todos os cenários considerados e independentes do momento em que esse nível é alcançado. *{Caixa de seção transversal.2}*

19 Na literatura, os termos trajetórias e cenários são utilizados de forma intercambiável, sendo o primeiro mais frequentemente utilizado em relação às metas climáticas. O WGI usou principalmente o termo cenários e o WGIII usou principalmente o termo trajetórias modeladas de emissão e mitigação. O SYR usa principalmente cenários quando se refere ao WGI e trajetórias modeladas de emissão e mitigação quando se refere ao WGIII.

20 Cerca de metade de todas as trajetórias de emissões modeladas globalmente assumem abordagens econômicas que dependem de opções de mitigação/redução de menor custo globalmente. A outra metade analisa as políticas existentes e as ações diferenciadas por região e setor.

21 Cenários baseados no SSP são referidos como SSPx-y, onde 'SSPx' se refere ao Trajetória Socioeconômica Compartilhada descrevendo as tendências socioeconômicas subjacentes aos cenários, e 'y' se refere ao nível de forçante radiativa (em watts por metro quadrado, ou W m^{-2}) resultante do cenário no ano 2100. *{Caixa de Seção Transversal.2}*

22 Cenários de emissões muito altas se tornaram *menos prováveis*, mas não podem ser descartados. Níveis de aquecimento >4ºC podem resultar de cenários de emissões muito altas, mas também podem ocorrer em cenários de emissões mais baixas se a sensibilidade climática ou os feedbacks do ciclo de carbono forem maiores do que a melhor estimativa. {3.1.1}

23 Os cenários baseados em RCP são referidos como RCPy, onde 'y' se refere ao nível de forçante radiativa (em watts por metro quadrado, ou W m^{-2}) resultante do cenário no ano 2100. Os cenários dos SSP cobrem uma gama mais ampla de futuros de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos do que os RCPs. São semelhantes, mas não idênticos, com diferenças nas trajetórias de concentração. A forçante radiativa efetiva geral tende a ser maior para os SSPs em comparação com os RCPs com a mesma denominação *(confiança média). {Caixa de Seção Transversal.2}*

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 26

Caixa SPM.1, Tabela 1: Descrição e relação de cenários e trajetórias modeladas considerados nos relatórios do Grupo de Trabalho AR6. *{Caixa de Seção Transversal.2 Figura 1}*

Categoria no WGIII	Descrição da categoria	Cenários de emissões de GEE (SSPx-y*) no WGI e WGII	RCPy** no WGI e WGII
C1	limitar o aquecimento a 1,5ºC (>50%), sem ou com ultrapassagem limitada***	Muito baixas (SSP1-1.9)	
C2	retornar o aquecimento a 1,5ºC (>50%) após uma alta ultrapassagem***		
C3	limitar o aquecimento a 2ºC (>67%)	Baixas (SSP1-2.6)	RCP2.6
C4	limitar o aquecimento a 2ºC (>50%)		
C5	limitar o aquecimento a 2,5ºC (>50%)		
C6	limitar o aquecimento a 3ºC (>50%)	Intermediárias (SSP2-4.5)	RCP 4.5
C7	limitar o aquecimento a 4ºC (>50%)	Altas (SSP3-7.0)	
C8	exceder o aquecimento de 4ºC (>50%)	Muito altas (SSP5-8.5)	RCP 8.5

* Consulte a nota de rodapé 21 para a terminologia SSPx-y.

** Consulte a nota de rodapé 23 para a terminologia RCPy.

*** Ultrapassagem limitada se refere a exceder 1,5ºC de aquecimento global em até cerca de 0,1ºC, alta ultrapassagem em 0,1ºC-0,3ºC, em ambos os casos por até várias décadas.

Progresso, Lacunas e Desafios Atuais de Mitigação

A.4 As políticas e leis que abordam a mitigação têm se expandido consistentemente desde o AR5. As emissões globais de GEE em 2030, implicadas pelas contribuições determinadas nacionalmente (NDCs) anunciadas até outubro de 2021, tornam *provável* que o aquecimento exceda 1,5ºC durante o século 21 e torne mais difícil limitar o aquecimento abaixo de 2ºC. Há lacunas entre as emissões projetadas das políticas implementadas e as das NDCs, e os fluxos financeiros ficam aquém dos níveis necessários para atingir as metas climáticas em todos os setores e regiões. *(alta confiança) {2.2,2.3, Figura 2.5, Tabela 2.2}*

A.4.1 A UNFCCC, o Protocolo de Quioto e o Acordo de Paris vêm apoiando níveis crescentes de ambição nacional. O Acordo de Paris, adotado no âmbito da UNFCCC, com participação quase universal, levou ao desenvolvimento de políticas e à definição de metas em níveis nacionais e subnacionais, principalmente em relação à mitigação, bem como ao aumento da transparência das ações climáticas e do apoio (*confiança média).* Muitos instrumentos regulatórios e econômicos já foram implantados com sucesso *(alta confiança).* Em muitos países, políticas têm aumentado a eficiência energética, reduzido as taxas de desmatamento e acelerado a implantação da tecnologia, evitando e, em alguns casos, reduzindo ou removendo as emissões (*alta confiança).* Várias linhas de evidência sugerem que as políticas de mitigação levaram a vários[24] Gt CO_2-eq ano^{-1} de emissões globais evitadas *(confiança média).* Pelo menos 18 países sustentaram reduções absolutas de GEE baseadas na produção e de CO_2 baseadas no consumo[25] por mais de 10 anos. Essas reduções compensaram apenas parcialmente o crescimento das emissões globais (*alta confiança). {2.2.1,2.2.2}*

[24] Pelo menos 1,8 GtCO_2-eq ano -1 pode ser contabilizado pela agregação de estimativas separadas para os efeitos de instrumentos econômicos e regulatórios. Números crescentes de leis e ordens executivas impactaram as emissões globais e foram estimados resultando em 5,9 GtCO_2-eq ano^{-1} menos emissões em 2016 do que teriam sido de outra forma. *(confiança média) {2.2.2}*

[25] As reduções estiveram relacionadas com a descarbonização da oferta de energia, ganhos de eficiência energética e redução da procura de energia, resultantes tanto de políticas como de alterações na estrutura económica *(alta confiança). {2.2.2}*

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 27

A.4.2 Várias opções de mitigação, em especial energia solar, energia eólica, eletrificação de sistemas urbanos, infraestrutura verde urbana, eficiência energética, gerenciamento pela procura, melhor gerenciamento de florestas e plantações/pastagens e redução do desperdício e da perda de alimentos, são tecnicamente viáveis, estão se tornando cada vez mais econômicas e, em geral, contam com o apoio do público. De 2010 a 2019, houve reduções sustentadas nos custos unitários de energia solar (85%), energia eólica (55%) e baterias de íons-lítio (85%) e grandes aumentos em sua implantação, por exemplo, > 10x para solar e >100x para veículos elétricos (EVs), variando amplamente entre as regiões. A combinação de instrumentos de política que reduziu custos e estimulou a adoção inclui P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) público, financiamento para projetos-piloto e de demonstração e instrumentos de atração de demanda, como subsídios de implantação para atingir escala. A manutenção de sistemas intensivos em emissões pode, em algumas regiões e setores, ser mais cara do que a transição para sistemas de baixa emissão. *(alta confiança) {2.2.2, Figura 2.4}*

A.4.3 Há uma "diferença de emissões" substancial entre as emissões globais de GEE em 2030 associadas à implementação das NDCs anunciadas antes da COP26[26] e aquelas associadas às trajetórias modeladas de mitigação que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada ou até 2ºC (>67%), assumindo uma ação imediata *(alta confiança).* Isso tornaria *provável* que o aquecimento exceda 1,5ºC durante o século 21 *(alta confiança).* Trajetórias de mitigação modeladas globalmente que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada ou até 2ºC (>67%) assumindo ações imediatas implicam profundas reduções globais de emissões de GEE nesta década *(alta confiança)* (consulte Caixa SPM 1, Tabela 1, B.6)[27]. Trajetórias modeladas que são consistentes com as NDCs anunciadas antes da COP26 até 2030 e assumem que não haverá aumento de ambição depois disso têm emissões mais elevadas, levando a um aquecimento global médio de 2,8 [2,1 a 3,4] ºC até 2100 *(confiança média).* Muitos países manifestaram a intenção de atingir emissões líquidas zero de GEE ou emissões líquidas zero de CO_2 até meados do século, mas os compromissos assumidos diferem de país para país em termos de escopo e especificidade, e políticas limitadas estão em vigor até o momento para cumpri-los. *{2.3.1, Tabela 2.2, Figura 2.5, Tabela 3.1,4.1}*

A.4.4 A cobertura da política é desigual entre os setores (*alta confiança).* As políticas implementadas até o final de 2020 deverão resultar em emissões globais de GEE mais elevadas em 2030 do que as emissões implicadas pelas NDCs, indicando uma 'diferença de implementação' *(alta confiança).* Sem o fortalecimento das políticas, estima-se um aquecimento global de 3,2 [2,2 a 3,5] ºC até 2100 *(confiança média). {2.2.2,2.3.1,3.1.1, Figura 2.5} (Caixa SPM.1, Figura SPM.5)*

A.4.5 A adoção de tecnologias de baixa emissão está atrasada na maioria dos países em desenvolvimento, particularmente os menos desenvolvidos, devido em parte ao financiamento, desenvolvimento e transferência de tecnologia e capacidade limitados *(confiança média).* A magnitude dos fluxos de financiamento climático aumentou na última década e os canais de financiamento se ampliaram, mas o crescimento desacelerou desde 2018 (*alta confiança).* Os fluxos de financiamento se desenvolveram de forma heterogênea entre regiões e setores (*alta confiança).* Os fluxos de financiamento público e privado para combustíveis fósseis ainda são maiores do que os de adaptação e mitigação climática (*alta confiança).* A esmagadora maioria dos financiamentos rastreados no domínio do clima é direcionada para a mitigação, mas ainda assim fica aquém dos níveis necessários para limitar o aquecimento abaixo de 2ºC ou 1,5ºC em todos os setores e regiões (consulte C7.2) *(confiança muito alta).* Em 2018, os fluxos de financiamento climático público e privado mobilizados publicamente dos países desenvolvidos para os países em desenvolvimento ficaram abaixo da meta coletiva da UNFCCC e do Acordo de Paris de mobilizar US$ 100 bilhões por ano até 2020, no contexto de ações significativas de mitigação e transparência na implementação *(confiança média). {2.2.2,2.3.1,2.3.3}*

[26] Devido à data limite da literatura do WGIII, as NDCs adicionais enviadas após 11 de outubro de 2021 não são aqui avaliadas. *{Nota de rodapé 32 no Relatório Mais Longo}*

[27] As emissões de GEE estimadas para 2030 são de 50 (47-55) $GtCO_2$-eq se todos os elementos das NDCs condicionais forem levados em consideração. Sem os elementos condicionais, as emissões globais são estimadas para serem aproximadamente semelhantes aos níveis modelados de 2019 em 53 (50-57) $GtCO_2$-eq. *{2.3.1, Tabela 2.2}*

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 28

B. Mudança do Clima Futura, Riscos e Respostas de Longo Prazo

Mudança do Clima Futura

B.1 As emissões contínuas de gases de efeito estufa levarão ao aumento do aquecimento global, sendo a melhor estimativa atingir 1,5ºC no curto prazo nos cenários considerados e trajetórias modeladas. Cada incremento do aquecimento global intensificará riscos múltiplos e simultâneos *(alta confiança).* Reduções profundas, rápidas e sustentadas nas emissões de gases de efeito estufa levariam a uma desaceleração perceptível do aquecimento global em cerca de duas décadas, bem como a mudanças perceptíveis na composição atmosférica em poucos anos *(alta confiança). {Caixas de Seção Transversal 1 e 2, 3.1, 3.3, Tabela 3.1, Figura 3.1, 4.3} (Figura SPM.2, Caixa SPM.1)*

B.1.1 O aquecimento global[28] continuará aumentando no curto prazo (2021-2040) principalmente devido ao aumento das emissões acumuladas de CO_2 em quase todos os cenários considerados e trajetórias modeladas. No curto prazo, *é mais provável do que improvável* que o aquecimento global atinja 1,5ºC mesmo sob o cenário de emissões de GEE muito baixas (SSP1-1.9) e *provável* ou *muito provável* que exceda 1,5ºC sob cenários de emissões mais altas. Nos cenários considerados e nas trajetórias modeladas, as melhores estimativas do momento em que se atinge o nível de aquecimento global de 1,5ºC situam-se no curto prazo[29]. O aquecimento global retorna para menos de 1,5ºC até o final do século 21 em alguns cenários e trajetórias modeladas (consulte B.7). A resposta climática avaliada para os cenários de emissões de GEE resulta em uma melhor estimativa do aquecimento para 2081-2100 que abrange uma faixa de 1,4ºC para um cenário de emissões de GEE muito baixas (SSP1-1,9) a 2,7ºC para um cenário de emissões de GEE intermediárias (SSP2-4,5) e 4,4ºC para um cenário de emissões de GEE muito altas (SSP5-8,5)[30], com faixas de incerteza[31] mais estreitas do que para os cenários correspondentes no AR5. *{Caixas de Seção Transversal 1 e 2,3.1.1,3.3.4, Tabela 3.1, 4.3}* (*Caixa SPM.1)*

B.1.2 Diferenças perceptíveis nas tendências da temperatura da superfície global entre cenários contrastantes de emissões de GEE (SSP1-1.9 e SSP1-2.6 vs. SSP3-7.0 e SSP5-8.5) começariam a emergir da variabilidade natural[32] em cerca de 20 anos. Nestes cenários contrastantes, efeitos discerníveis surgiriam dentro de anos para as concentrações de GEE e mais cedo para as melhorias da qualidade do ar, devido à combinação de controles direcionados da poluição do ar e reduções fortes e sustentadas das emissões de metano. Reduções direcionadas de emissões de poluentes atmosféricos levam a melhorias mais rápidas na qualidade do ar dentro de anos em comparação com reduções apenas nas emissões de GEE, no entanto, a longo prazo, são projetadas melhorias adicionais em cenários que combinam esforços para reduzir as emissões de poluentes atmosféricos e de GEE[33]. *(alta confiança) {3.1.1} (Caixa SPM.1)*

B.1.3 As emissões contínuas afetarão ainda mais todos os principais componentes do sistema climático. A cada incremento adicional do aquecimento global, as mudanças nos extremos continuam se tornando maiores. Projeta-se que o aquecimento global contínuo intensificará ainda mais o ciclo global da água, incluindo sua variabilidade, precipitação global das monções, e estações e eventos de tempo e clima muito úmidos e muito secos *(alta confiança).* Em cenários com emissões de CO_2 crescentes, os sumidouros naturais

[28] O aquecimento global (consulte o Anexo I: Glossário) é relatado aqui como uma média de 20 anos, salvo indicação em contrário, em relação a 1850-1900. A temperatura global da superfície em qualquer ano pode variar acima ou abaixo da tendência de longo prazo causada pelo homem, devido à variabilidade natural. A variabilidade interna da temperatura global da superfície em um único ano é estimada em cerca de ± 0,25ºC (intervalo de 5-95%, *alta confiança*). A ocorrência de anos individuais com mudança na temperatura global da superfície acima de um certo nível não implica que esse nível de aquecimento global tenha sido alcançado. *{4.3, Caixa de Seção Transversal.2}*

[29] O intervalo mediano de cinco anos no qual um nível de aquecimento global de 1,5ºC é alcançado (50% de probabilidade) nas categorias de trajetórias modeladas consideradas no WGIII é 2030-2035. Até 2030, a temperatura global da superfície em qualquer ano individual pode exceder 1,5ºC em relação a 1850-1900 com uma probabilidade entre 40% e 60%, nos cinco cenários avaliados no WGI *(confiança média)*. Em todos os cenários considerados pelo WGI, com exceção do cenário de emissões muito altas (SSP5-8.5), o ponto intermediário do primeiro período médio de 20 anos em que a mudança média da temperatura da superfície global avaliada atinge 1,5ºC situa-se na primeira metade da década de 2030. No cenário de emissões de GEE muito altas, o ponto médio está no final da década de 2020. *{3.1.1, 3.3.1, 4.3} (Caixa SPM.1)*

[30] As melhores estimativas [e faixas *muito prováveis*] para os diferentes cenários são: 1,4 [1,0 a 1,8]ºC (SSP1-1.9); 1,8 [1,3 a 2,4]ºC (SSP1-2.6); 2,7 [2,1 a 3,5]ºC (SSP2-4.5); 3,6 [2,8 a 4,6]ºC (SSP3-7.0); e 4,4 [3,3 a 5,7]ºC (SSP5-8.5). {3.1.1} *(Caixa SPM.1)*

[31] As mudanças futuras na temperatura global da superfície avaliadas foram calculadas, pela primeira vez, combinando projeções de vários modelos com restrições observacionais e a sensibilidade climática de equilíbrio avaliada e a resposta climática transitória. A faixa de incerteza é mais estreita do que no AR5, graças ao melhor conhecimento dos processos climáticos, evidências paleoclimáticas e restrições emergentes baseadas em modelos. {3.1.1}

[32] Consulte o Anexo I: Glossário. A variabilidade natural inclui fatores naturais e variabilidade interna. Os principais fenômenos de variabilidade interna incluem o El Niño - Oscilação Sul, Variabilidade Decenal do Pacífico e Variabilidade Multidecenal do Atlântico. {4.3}

[33] Com base em cenários adicionais

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 29

de carbono terrestres e oceânicos são projetados para absorver uma proporção decrescente dessas emissões *(alta confiança).* Outras mudanças projetadas incluem extensões e/ou volumes ainda mais reduzidos de quase todos os elementos criosféricos[34] (*alta confiança),* aumento global médio do nível do mar *(virtualmente certo)* e aumento da acidificação *(virtualmente certo)* e desoxigenação *(alta confiança)* dos oceanos. *{3.1.1,3.3.1, Figura 3.4} (Figura SPM.2)*

B.1.4 Com o aumento do aquecimento, cada região é projetada para experienciar cada vez mais mudanças simultâneas e múltiplas em fatores de impacto climático. Projeta-se que a composição de ondas de calor e secas se tornem mais frequentes, incluindo eventos simultâneos em vários locais (*alta confiança).* Devido ao aumento relativo do nível do mar, os atuais eventos extremos do nível do mar de 1 em 100 anos são projetados para ocorrer pelo menos anualmente em mais da metade de todos os locais de marégrafo até 2100, em todos os cenários considerados *(alta confiança).* Outras mudanças regionais previstas incluem a intensificação de ciclones tropicais e/ou tempestades extratropicais *(confiança média)* e aumento da aridez e de condições atmosféricas propícias para incêndio *(confiança média a alta). {3.1.1,3.1.3}*

B.1.5 A variabilidade natural continuará modulando as mudanças climáticas causadas pelo homem, atenuando ou ampliando as mudanças projetadas, com pouco efeito no aquecimento global em escala centenária (*alta confiança).* É importante considerar essas modulações no planejamento da adaptação, especialmente em escala regional e no curto prazo. Caso uma grande erupção vulcânica explosiva[35] viesse a ocorrer, mascararia temporária e parcialmente as mudanças climáticas causadas pelo homem, reduzindo a temperatura da superfície do planeta e a precipitação por um a três anos *(confiança média). {4.3}*

[34] Permafrost, cobertura de neve sazonal, Geleiras, Calotas de Gelo da Groenlândia e da Antártica e gelo marinho do Ártico.

[35] Com base em reconstruções de 2.500 anos, as erupções com forçante radiativa mais negativa que -1 W m^{-2}, relacionadas ao efeito radiativo de aerossóis estratosféricos vulcânicos na literatura avaliada neste relatório, ocorrem em média duas vezes por século. {4.3}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 30

Com cada incremento do aquecimento global, as mudanças regionais no clima médio e nos extremos se tornam mais generalizadas e pronunciadas.

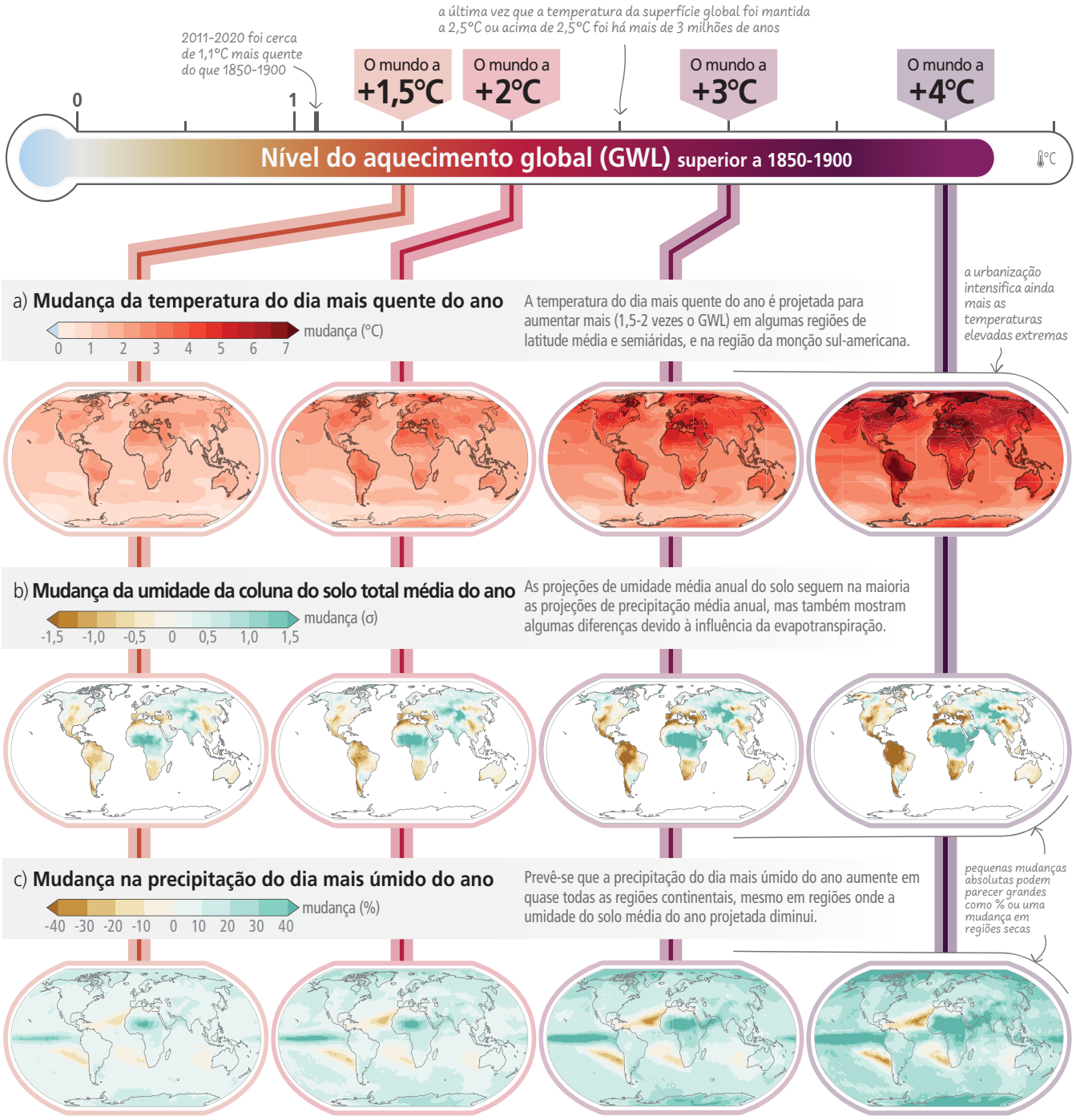


Figura SPM.2: Mudanças projetadas da temperatura máxima diária anual, umidade da coluna do solo total média anual e precipitação de 1 dia máxima anual em níveis de aquecimento global de 1,5°C, 2°C, 3°C e 4°C em relação a 1850-1900. Mudança projetada **(a)** da temperatura máxima diária anual (°C), **(b)** Mudança da média anual da coluna total de umidade no solo (desvio padrão), **(c)** Mudança da máxima precipitação do ano em 1-dia (%). Os painéis mostram as mudanças medianas de vários modelos CMIP6. Nos painéis (b) e (c), grandes mudanças relativas positivas em regiões secas podem corresponder a pequenas mudanças absolutas. No painel (b), a unidade é o desvio padrão da variabilidade interanual da umidade do solo durante 1850-1900. O desvio padrão é uma métrica amplamente utilizada para caracterizar a gravidade da seca. Uma redução projetada na umidade média do solo por um desvio padrão corresponde às condições de umidade do solo típicas das secas que ocorreram aproximadamente uma vez a cada seis anos durante 1850-1900. O Atlas Interativo do WGI (https://interactive-atlas.ipcc.ch/) pode ser usado para explorar mudanças adicionais no sistema climático em toda a gama de níveis de aquecimento global apresentados nesta figura. *{Figura 3.1, Caixa de seção transversal.2}*

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 31

Impactos das Mudanças do Clima e Riscos Relacionados ao Clima

B.2 Para qualquer nível de aquecimento futuro, muitos riscos relacionados ao clima são maiores do que os avaliados no AR5, e os impactos de longo prazo projetados são várias vezes maiores do que os observados atualmente *(alta confiança).* Os riscos e os impactos adversos projetados e as perdas e danos relacionados às mudanças do clima aumentam a cada incremento do aquecimento global *(confiança muito alta).* Os riscos climáticos e não climáticos vão interagir cada vez mais, criando riscos compostos e em cascata, mais complexos e difíceis de gerir *(alta confiança). {Caixa de Seção Transversal.2, 3.1, 4.3, Figura 3.3, Figura 4.3} (Figura SPM.3, Figura SPM.4)*

B.2.1 A curto prazo, todas as regiões do mundo estão projetadas para enfrentar aumentos adicionais das ameças climáticas (confiança *média* a *alta,* dependendo da região e da ameaça), aumentando os riscos múltiplos para os ecossistemas e os seres humanos *(confiança muito alta).* As ameaças e riscos associados esperados a curto prazo incluem aumento da mortalidade e morbidade humanas relacionadas ao calor (*alta confiança*), doenças transmitidas por alimentos, água e vetores (*alta confiança)*, e problemas de saúde mental[36] *(confiança muito alta)*, inundações em cidades e regiões costeiras e outras cidades e regiões baixas (*alta confiança)*, perda de biodiversidade em ecossistemas terrestres, de água doce e oceânicos (*confiança* média a *muito alta*, dependendo do ecossistema) e uma diminuição da produção de alimentos em algumas regiões (*alta confiança).* Mudanças relacionadas à criosfera em inundações, deslizamentos de terra e disponibilidade de água têm o potencial de levar a consequências graves para pessoas, infraestrutura e economia na maioria das regiões montanhosas *(alta confiança).* O aumento projetado na frequência e intensidade da precipitação intensa (*alta confiança)* aumentará as enchentes locais geradas pela chuva *(confiança média). {Figura 3.2, Figura 3.3, 4.3, Figura 4.3} (Figura SPM.3, Figura SPM.4)*

B.2.2 Os riscos e os impactos adversos projetados e as perdas e danos relacionados às mudanças do clima aumentarão a cada incremento do aquecimento global *(confiança muito alta).* Eles são mais altos para o aquecimento global de 1,5ºC do que para o atual, e ainda mais altos para 2ºC (*alta confiança).* Em comparação com o AR5, os níveis globais de risco agregado[37] (Motivos de Preocupação[38]) são avaliados como altos a muito altos em níveis mais baixos de aquecimento global devido a evidências recentes dos impactos observados, melhor compreensão dos processos e novos conhecimentos com relação à exposição e vulnerabilidade de sistemas humanos e naturais, incluindo limites de adaptação *(alta confiança).* Devido ao inevitável aumento do nível do mar (consulte também B.3), os riscos para os ecossistemas costeiros, pessoas e infraestruturas continuarão aumentando após 2100 (*alta confiança). {3.1.2,3.1.3, Figura 3.4, Figura 4.3} (Figura SPM.3, Figura SPM.4)*

B.2.3 Com aquecimento adicional, os riscos da mudança do clima se tornarão cada vez mais complexos e mais difíceis de administrar. Múltiplos fatores de risco climáticos e não climáticos irão interagir, resultando na composição do risco geral e dos riscos em cascata entre setores e regiões. Projeta-se, por exemplo, que a insegurança alimentar e a instabilidade do abastecimento provocadas pelo clima aumentem com o aumento do aquecimento global, interagindo com fatores de risco não climáticos, como a concorrência por terras entre a expansão urbana e a produção de alimentos, pandemias e conflitos. (*alta confiança) {3.1.2,4.3, Figura 4.3}*

B.2.4 Para qualquer nível de aquecimento, o nível de risco também dependerá das tendências de vulnerabilidade e exposição dos seres humanos e ecossistemas. A exposição futura aos riscos climáticos está aumentando globalmente devido às tendências de desenvolvimento socioeconômico, incluindo a migração, crescente desigualdade e urbanização. A vulnerabilidade humana se concentrará em assentamentos informais e assentamentos menores em rápido crescimento. Nas áreas rurais, a vulnerabilidade será intensificada pela alta dependência de meios de subsistência sensíveis ao clima. A vulnerabilidade dos ecossistemas será fortemente influenciada por padrões passados, presentes e futuros de consumo e produção insustentáveis, pressões demográficas crescentes e uso e gestão persistente e insustentável da terra, oceano e água. A perda de ecossistemas e seus serviços têm impactos em cascata e a longo prazo sobre as pessoas em todo o mundo, especialmente para os Povos Indígenas e comunidades locais que dependem diretamente dos ecossistemas, para atender às necessidades básicas. (*alta confiança) {Caixa de Seção Transversal.2 Figura 1c, 3.1.2,4.3}*

[36] Em todas as regiões avaliadas.

[37] O nível de risco não detectável indica que nenhum impacto associado é detectável e atribuível à mudança do clima; o risco moderado indica que os impactos associados são ambos detectáveis e atribuíveis à mudança do clima com pelo menos *confiança média*, também levando em conta outros critérios específicos para os principais riscos; o risco alto indica impactos severos e generalizados que são considerados altos em um ou mais critérios para avaliar os principais riscos; e o nível de risco muito alto indica risco muito alto de impactos severos e a presença de irreversibilidade significativa ou a persistência de perigos relacionados ao clima, combinados com capacidade limitada de adaptação devido à natureza do perigo ou impactos/riscos. *{3.1.2}*

[38] A estrutura dos Motivos de Preocupação (RFC) comunica o entendimento científico sobre a acumulação de risco para cinco categorias amplas. RFC1: Sistemas únicos e ameaçados: sistemas ecológicos e humanos, com faixas geográficas restritas, limitados pelas condições climáticas e com alto endemismo ou outras propriedades distintivas. RFC2: Eventos climáticos extremos: riscos/impactos à saúde humana, meios de subsistência, ativos e ecossistemas decorrentes de eventos climáticos extremos. RFC3: Distribuição de impactos: riscos/impactos que afetam desproporcionalmente grupos específicos devido à distribuição desigual de perigos físicos da mudança climática, exposição ou vulnerabilidade. RFC4: Impactos globais agregados: impactos aos sistemas socioecológicos que podem ser agregados globalmente em uma única métrica. RFC5: Eventos singulares de grande escala: mudanças relativamente grandes, abruptas e às vezes irreversíveis em sistemas, causadas pelo aquecimento global. Consulte também o Anexo I: Glossário. *{3.1.2, Caixa de Seção Transversal.2}*

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 32

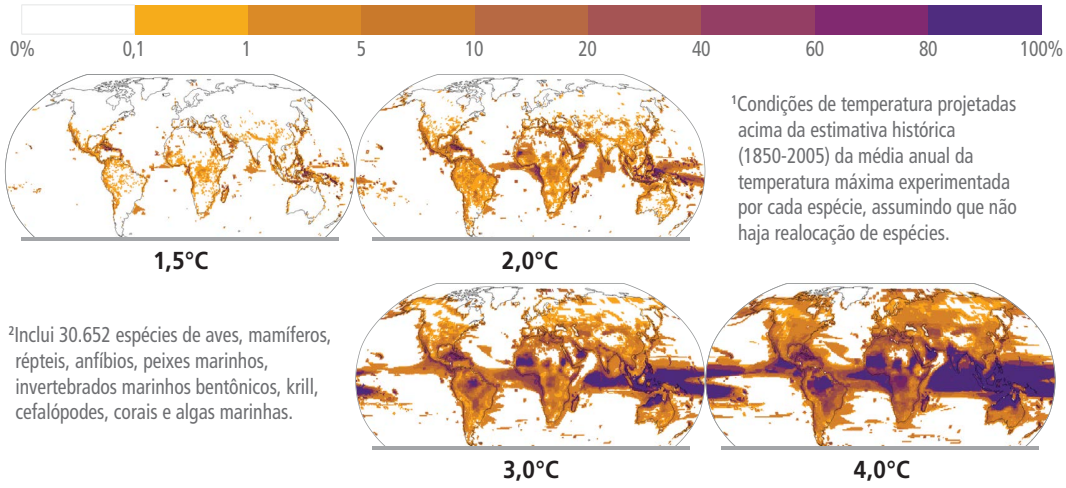
É previsto que as mudanças climáticas futuras aumentem a gravidade dos impactos em sistemas naturais e humanos e aumentem as diferenças regionais

Exemplos de impactos sem adaptação adicional



a) Risco de perda de espécies

Porcentagem de espécies animais e algas marinhas expostas a condições de temperatura potencialmente perigosas[1, 2]

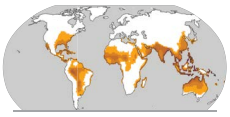


[1]Condições de temperatura projetadas acima da estimativa histórica (1850-2005) da média anual da temperatura máxima experimentada por cada espécie, assumindo que não haja realocação de espécies.

[2]Inclui 30.652 espécies de aves, mamíferos, répteis, anfíbios, peixes marinhos, invertebrados marinhos bentônicos, krill, cefalópodes, corais e algas marinhas.

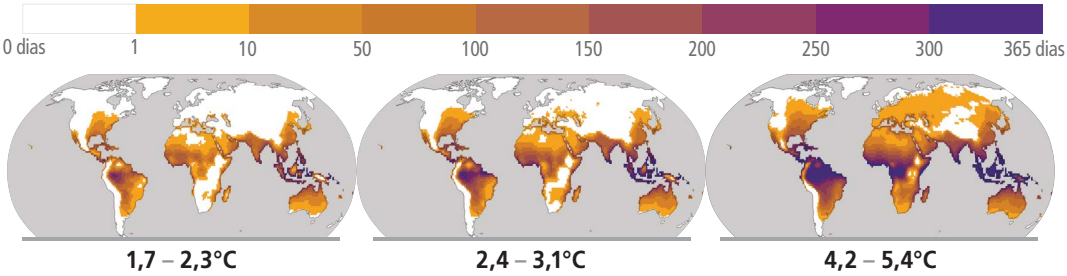


b) Calor-umidade Riscos para a saúde humada



Histórico 1991–2005

Dias por ano em que as condições combinadas de temperatura e umidade representam um risco de mortalidade para os indivíduos[3]



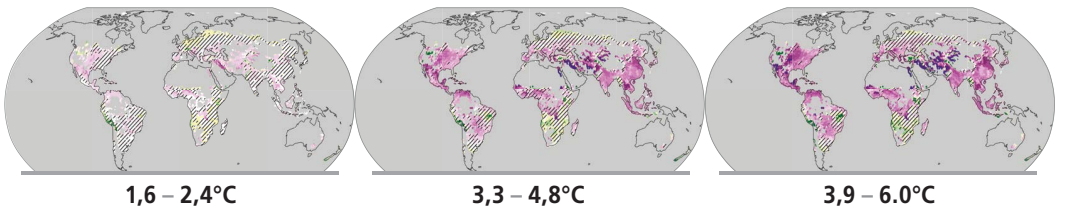
[3]Os impactos regionais projetados utilizam um limiar global além do qual a temperatura do ar de superfície média diária e a umidade relativa do ar podem induzir hipertermia, o que representa um risco de mortalidade. A duração e a intensidade das ondas de calor não são apresentadas aqui. Os resultados de saúde relacionados ao calor variam de acordo com o local e são altamente moderados por determinantes socioeconômicos, ocupacionais e outros não climáticos da saúde individual e da vulnerabilidade socioeconômica. O limite usado nesses mapas se baseia em um único estudo que sintetizou dados de 783 casos para determinar a relação entre as condições de calor e umidade e a mortalidade, com base principalmente em observações em climas temperados.

c) Impactos na produção de alimentos



c1) Produção de milho[4]

Mudanças (%) na produção

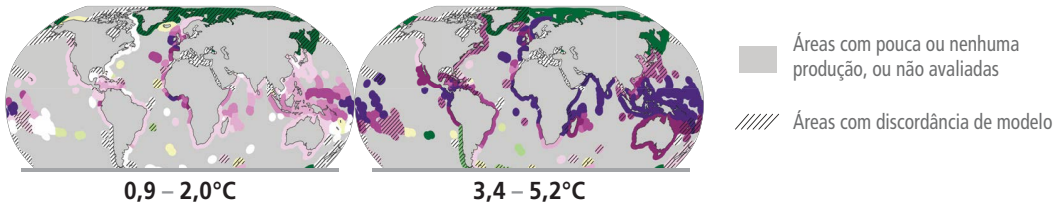


[4]Os impactos regionais projetados refletem respostas biofísicas às mudanças de temperatura, precipitação, radiação solar, umidade, vento e aumento de CO_2 no crescimento e retenção de água em áreas atualmente cultivadas. Os modelos assumem que as áreas irrigadas não são limitadas pela água. Os modelos não representam pragas, doenças, mudanças futuras da agro-tecnologia e algumas respostas climáticas extremas.



c2) Rendimento da pesca5[5]

Mudanças (%) no potencial máximo de captura



[5]Os impactos regionais projetados refletem as respostas da pesca e dos ecossistemas marinhos às condições físicas e biogeoquímicas dos oceanos, tais como temperatura, nível de oxigênio e produção primária líquida. Os modelos não representam mudanças nas atividades de pesca e algumas condições climáticas extremas. As mudanças projetadas nas regiões árticas têm baixa confiança devido às incertezas associadas à modelagem de múltiplos fatores de interação e respostas do ecossistema.

Figura SPM.3: Riscos e impactos projetados devido à mudança do clima nos sistemas naturais e humanos em diferentes níveis de aquecimento global (GWLs) em relação aos níveis de 1850-1900. Os riscos e impactos projetados mostrados nos mapas são baseados nos resultados de diferentes subconjuntos de modelos de sistema terrestre e de impacto usados para projetar cada indicador de impacto sem adaptações adicionais. O WGII fornece uma avaliação adicional dos impactos sobre os sistemas humanos e naturais usando essas projeções e linhas de evidência adicionais. **(a)** Riscos de perdas de espécies, conforme indicado pela porcentagem de espécies avaliadas expostas a

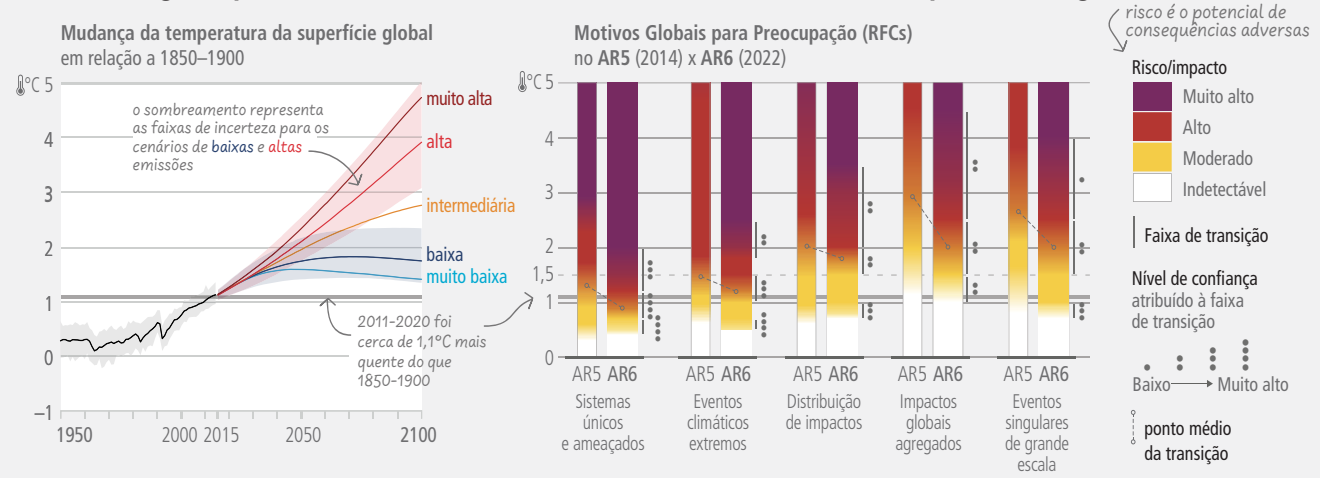
Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 33

condições de temperatura potencialmente perigosas, conforme definido por condições acima da estimativa histórica (1850-2005) da média anual da temperatura máxima experimentada por cada espécie, em GWLs de 1,5ºC, 2ºC, 3ºC e 4ºC. As projeções subjacentes de temperatura são de 21 modelos de sistemas terrestres e não consideram eventos extremos que impactam ecossistemas como o Ártico. **(b)** Risco à saúde humana, conforme indicado pelos dias por ano de exposição da população a condições hipertérmicas que representam um risco de mortalidade por condições de temperatura e umidade do ar de superfície para o período histórico (1991-2005) e em GWLs de 1,7ºC-2,3ºC (média = 1,9ºC; 13 modelos climáticos), 2,4ºC-3,1ºC (2,7ºC; 16 modelos climáticos) e 4,2ºC-5,4ºC (4,7ºC; 15 modelos climáticos). Intervalos interquartis de GWLs até 2081-2100 segundo RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5. O índice apresentado é consistente com características comuns encontradas em muitos índices incluídos nas avaliações do WGI e WGII. **(c)** Impactos na produção de alimentos: (c1) Mudanças na produção de milho em 2080-2099 em relação a 1986-2005 em GWLs projetados de 1,6ºC-2,4ºC (2,0ºC), 3,3ºC-4,8ºC (4,1 ºC) e 3,9ºC-6,0ºC (4,9ºC). A produção média muda de um conjunto de 12 modelos de safras, cada um impulsionado por rendimentos ajustados por viés de 5 modelos de sistemas terrestres do Projeto de Intercomparação e Aprimoramento de Modelos Agrícolas (AgMIP) e do Projeto do Modelo de Impacto Intersetorial e de Intercomparação (ISIMIP). Os mapas mostram 2080-2099 em comparação com 1986-2005 para as regiões atuais de cultivo (>10 ha), com a faixa correspondente de níveis futuros de aquecimento global mostrados em SSP1-2.6, SSP3-7.0 e SSP5-8.5, respectivamente. As linhas sombreadas indicam áreas em que <70% das combinações de modelos de clima-cultura concordam com o sinal do impacto. (c2) Mudança no potencial máximo de captura da pesca em 2081-2099 em relação a 1986-2005 em GWLs projetados de 0,9°C-2,0°C (1,5°C) e 3,4°C-5,2°C (4,3°C). GWLs até 2081-2100 sob RCP2.6 e RCP8.5. As linhas sombreadas indicam onde os dois modelos de clima-pesca discordam quanto à direção da mudança. Grandes mudanças relativas em regiões de baixa produtividade podem corresponder a pequenas mudanças absolutas. A biodiversidade e a pesca na Antártica não foram analisadas devido a limitações de dados. A segurança alimentar também é afetada por falhas nas colheitas e na pesca não apresentadas aqui. {3.1.2, Figura 3.2, Caixa de Seção Transversal. 2} (Caixa SPM.1)

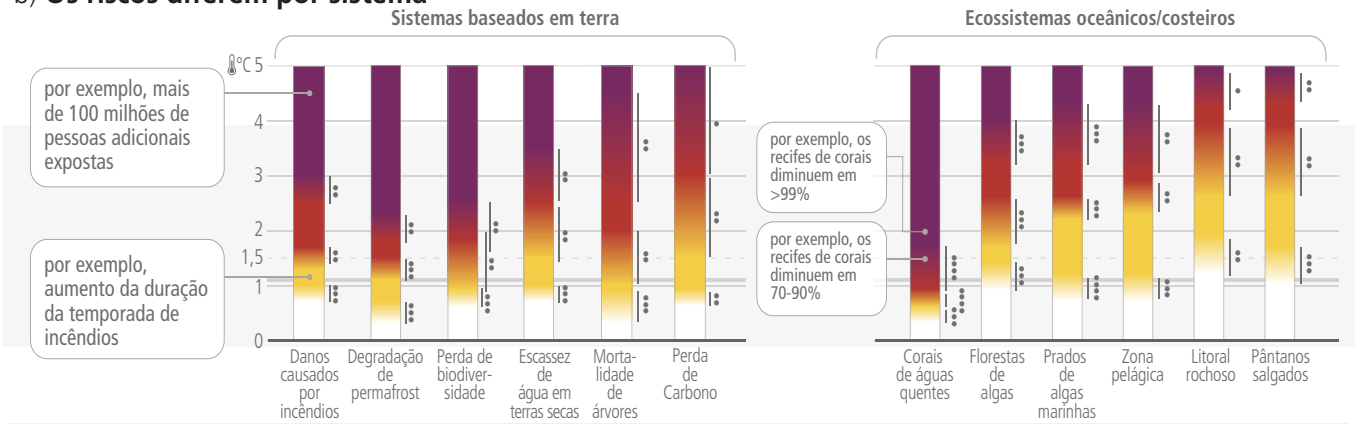
Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 34

Os riscos estão aumentando com cada incremento de aquecimento

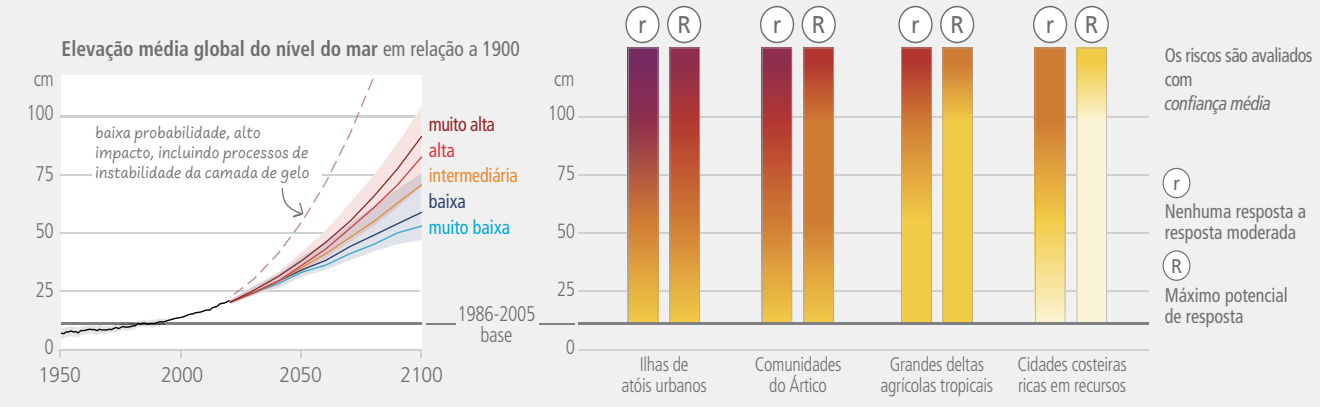
a) Avalia-se agora que os altos riscos ocorrerão em níveis mais baixos de aquecimento global



b) Os riscos diferem por sistema

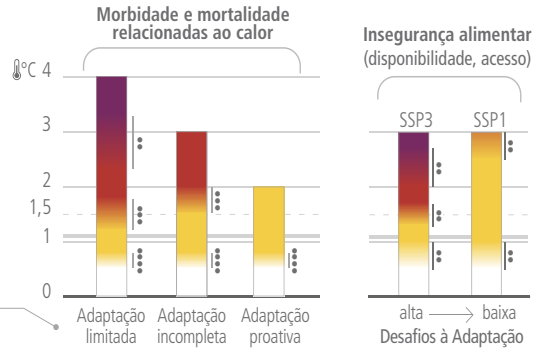


c) Os riscos para as geografias costeiras aumentam com a elevação do nível do mar e dependem das respostas



d) Adaptação e trajetórias socioeconômicas afetam os níveis de riscos relacionados ao clima

Adaptação limitada (falha na adaptação proativa; baixo investimento em sistemas de saúde); adaptação incompleta (planejamento de adaptação incompleta; investimento moderado em sistemas de saúde); adaptação proativa (gerenciamento da adaptação proativa; maior investimento em sistemas de saúde)



A trajetória SSP1 ilustra um mundo com baixo crescimento populacional, alta renda e redução das desigualdades, alimentos produzidos em sistemas de baixa emissão de GEE, regulamentação eficaz do uso da terra e alta capacidade de adaptação (ou seja, baixos desafios à adaptação). A trajetória SSP3 tem tendências opostas.

Figura SPM.4: Subconjunto dos resultados climáticos avaliados e riscos climáticos globais e regionais associados. As brasas queimando resultam de uma elicitação de especialistas baseada em literatura. **Painel (a): Esquerda** - Mudanças na temperatura da superfície global em °C em relação a 1850-1900. Tais mudanças foram obtidas

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 35

combinando simulações do modelo CMIP6 com restrições observacionais baseadas no aquecimento simulado no passado, bem como uma avaliação atualizada da sensibilidade climática de equilíbrio. Faixas *muito prováveis* são mostradas para os cenários de emissões de GEE baixas e altas (SSP1-2.6 e SSP3-7.0) (Caixa de Seção Transversal.2). **Direita** - Motivos Globais de Preocupação (RFC), comparando as avaliações do AR6 (brasas grossas) e AR5 (brasas finas). As transições de risco geralmente mudaram para temperaturas mais baixas com o conhecimento científico atualizado. Os diagramas são mostrados para cada RFC, assumindo pouca ou nenhuma adaptação. As linhas conectam os pontos médios das transições de risco moderado a alto no AR5 e AR6. **Painel (b)**: Riscos globais selecionados para ecossistemas terrestres e oceânicos, ilustrando o aumento geral do risco com níveis de aquecimento global com pouca ou nenhuma adaptação. **Painel (c): Esquerda** - Mudança média global do nível do mar, em centímetros, em relação a 1900. As mudanças históricas (preto) são observadas por maréógrafos antes de 1992 e altímetros após 1992. As mudanças futuras até 2100 (linhas coloridas e sombreamento) são avaliadas de forma consistente com as restrições observacionais baseadas na emulação de modelos CMIP, calotas de gelo e geleiras, e os intervalos *prováveis* são mostrados para SSP1-2.6 e SSP3-7.0. **Direita**- Avaliação do risco combinado de inundações costeiras, erosão e salinização para quatro geografias costeiras ilustrativas em 2100, devido à mudança do nível médio e extremo do mar, sob dois cenários de resposta, em relação ao período base do SROCC (1986-2005). A avaliação não considera as mudanças no nível extremo do mar além daquelas diretamente induzidas pelo aumento médio do nível do mar; os níveis de risco poderiam aumentar se outras mudanças nos níveis extremos do mar fossem consideradas (por exemplo, devido a mudanças na intensidade dos ciclones). "Nenhuma resposta a resposta moderada" descreve os esforços até hoje (ou seja, nenhuma outra ação significativa ou novos tipos de ações). "Resposta máxima potencial" representa uma combinação de respostas implementadas em toda sua extensão, portanto, esforços adicionais significativos em comparação com os atuais, assumindo o mínimo de barreiras financeiras, sociais e políticas. (Neste contexto, 'atuais' refere-se a 2019). Os critérios de avaliação incluem exposição e vulnerabilidade, perigos costeiros, respostas in situ e realocação planejada. A realocação planejada se refere à retirada ou reassentamentos gerenciados. O termo resposta é utilizado aqui ao invés de adaptação, porque algumas respostas, como o recuo, podem ou não ser consideradas adaptação. **Painel (d)**: Riscos selecionados em diferentes trajetórias socioeconômicas, ilustrando como as estratégias de desenvolvimento e os desafios de adaptação influenciam o risco. **Esquerda**- Resultados da saúde humana sensíveis ao calor sob três cenários de eficácia de adaptação. Os diagramas são truncados no ºC inteiro mais próximo dentro da faixa de variação de temperatura em 2100, sob três cenários de SSP. **Direita** - Riscos associados à segurança alimentar devido às mudanças do clima e aos padrões de desenvolvimento socioeconômico. Os riscos à segurança alimentar incluem disponibilidade e acesso a alimentos, incluindo a população em risco de fome, aumentos no preço dos alimentos e aumentos nos anos de vida ajustados por deficiência atribuíveis ao baixo peso infantil. Os riscos são avaliados para duas trajetórias socioeconômicas contrastadas (SSP1 e SSP3), excluindo os efeitos de políticas de mitigação e adaptação específicas. *{Figura 3.3} (Caixa SPM.1)*

Probabilidade e Riscos de Mudanças Inevitáveis, Irreversíveis ou Abruptas

B.3 Algumas mudanças futuras são inevitáveis e/ou irreversíveis, mas podem ser limitadas por uma redução profunda, rápida e sustentada das emissões globais de gases de efeito estufa. A probabilidade de mudanças abruptas e/ou irreversíveis aumenta com níveis mais altos de aquecimento global. Da mesma forma, a probabilidade de resultados de baixa probabilidade associados a impactos adversos potencialmente muito grandes aumenta com níveis mais altos de aquecimento global. *(alta confiança) {3,7}*

B.3.1 Limitar a temperatura da superfície global não impede mudanças contínuas nos componentes do sistema climático com escalas de tempo de resposta multi-decadais ou mais longas *(alta confiança).* A elevação do nível do mar é inevitável por séculos a milênios devido ao contínuo aquecimento profundo do oceano e ao derretimento das calotas de gelo, e o nível do mar permanecerá elevado por milhares de anos *(alta confiança).* No entanto, reduções profundas, rápidas e sustentadas das emissões de GEE limitariam a aceleração adicional da elevação do nível do mar e o compromisso projetado de elevação do nível do mar no longo prazo. Em relação a 1995-2014, a elevação média global *provável* do nível do mar sob o cenário SSP1-1.9 de emissões de GEE é de 0,15-0,23 m até 2050 e 0,28-0,55 m até 2100; enquanto para o cenário SSP5-8.5 de emissões de GEE é de 0,20-0,29 m até 2050 e 0,63-1,01 m até 2100 *(confiança média).* Nos próximos 2000 anos, o nível médio global do mar subirá cerca de 2-3 m se o aquecimento for limitado a 1,5ºC e 2-6 m se for limitado a 2ºC *(baixa confiança). {3.1.3, Figura 3.4} (Caixa SPM.1)*

B.3.2 A probabilidade e os impactos de mudanças abruptas e/ou irreversíveis no sistema climático, incluindo as mudanças desencadeadas ao atingir os pontos de não retorno, crescem com o aumento do aquecimento global (*alta confiança).* À medida que os níveis de aquecimento aumentam, aumentam também os riscos de extinção de espécies ou perda irreversível da biodiversidade em ecossistemas incluindo florestas *(confiança média),* recifes de corais *(confiança muito alta)* e nas regiões árticas *(confiança alta).* A níveis sustentados de aquecimento entre 2ºC e 3ºC, as calotas de gelo da Groenlândia e da Antártida Ocidental serão perdidas quase completa e irreversivelmente ao longo de vários milênios, causando vários metros de elevação do nível do mar *(evidências limitadas).* A probabilidade e a taxa de perda de massa de gelo aumentam com o aumento da temperatura da superfície global (*alta confiança). {3.1.2,3.1.3}*

B.3.3 A probabilidade de resultados de baixa probabilidade associados a impactos potencialmente muito grandes aumenta com níveis mais altos de aquecimento global (*alta confiança).* Devido à profunda incerteza ligada aos processos relacionados à calota de gelo, a elevação média global do nível do mar acima da faixa *provável* - aproximando-se de 2 m em 2100 e acima de 15 m em 2300 sob o cenário de emissões de GEE muito altas (SSP5-8.5) (*baixa confiança)* - não pode ser excluído. Há uma *confiança média* de que a Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico não entrará em colapso abruptamente antes de 2100, mas caso isso viesse a ocorrer, *provavelmente* causaria mudanças abruptas nos padrões climáticos regionais e grandes impactos nos ecossistemas e atividades humanas. {*3.1.3*} (*Caixa SPM.1)*

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 36

Opções de Adaptação e seus Limites em um Mundo Mais Quente

B.4 As opções de adaptação viáveis e eficazes hoje se tornarão limitadas e menos eficazes com o aumento do aquecimento global. Com o aumento do aquecimento global, as perdas e danos aumentarão e os sistemas humanos e naturais adicionais atingirão os limites de adaptação. A má adaptação pode ser evitada por meio de planejamento e implementação de ações de adaptação flexíveis, multissetoriais, inclusivos e de longo prazo, com cobenefícios para muitos setores e sistemas. *(alta confiança) {3.2, 4.1, 4.2, 4.3}*

B.4.1 A eficácia da adaptação, incluindo as opções baseadas no ecossistema e a maioria das relacionadas à água, diminuirá com o aumento do aquecimento. A viabilidade e eficácia das opções aumentam com soluções integradas e multissetoriais que diferenciam respostas baseadas no risco climático, atravessam sistemas e abordam as desigualdades sociais. Como as opções de adaptação costumam ter longos períodos de implementação, o planejamento de longo prazo aumenta sua eficácia. *(alta confiança) {3.2, Figura 3.4, 4.1,4.2}*

B.4.2 Com o aquecimento global adicional, os limites de adaptação e as perdas e danos, fortemente concentrados entre as populações vulneráveis, tornar-se-ão cada vez mais difíceis de serem evitados (*confiança alta).* Com um aquecimento global acima de 1,5ºC, os recursos limitados de água doce representam possíveis limites de adaptação severos para pequenas ilhas e para regiões dependentes do derretimento das geleiras e da neve *(confiança média).* Acima desse nível, ecossistemas como alguns recifes de corais de águas quentes, pântanos costeiros, florestas tropicais e ecossistemas polares e montanhosos atingirão ou ultrapassarão os limites de adaptação rígidos e, consequentemente, algumas medidas de adaptação baseadas em ecossistemas também perderão sua eficácia (*alta confiança). {2.3.2, 3.2,4.3}*

B.4.3 Ações concentradas em setores e riscos isoladamente e em ganhos de curto prazo frequentemente levam a uma má adaptação a longo prazo, criando bloqueios de vulnerabilidade, exposição e riscos difíceis de mudar. Por exemplo, os quebra-mares reduzem efetivamente os impactos para as pessoas e ativos no curto prazo, mas também podem resultar em bloqueios e aumentar a exposição aos riscos climáticos a longo prazo, a menos que sejam integrados em um plano de adaptação a longo prazo. Respostas inadequadas podem piorar as desigualdades existentes, especialmente para os Povos Indígenas e grupos marginalizados, bem como diminuir a resiliência do ecossistema e da biodiversidade. A má adaptação pode ser evitada por meio de planejamento e implementação de ações de adaptação flexíveis, multissetoriais, inclusivos e de longo prazo, com cobenefícios para muitos setores e sistemas. *(alta confiança) {2.3.2,3.2}*

Orçamentos de Carbono e Emissões Líquidas Zero

B.5 A limitação do aquecimento global causado pelo homem requer emissões líquidas zero de CO_2. As emissões acumuladas de carbono até atingir as emissões líquidas zero de CO_2 e o nível de redução das emissões de gases de efeito estufa nesta década determinam em grande parte se o aquecimento pode ser limitado a 1,5ºC ou 2ºC *(alta confiança).* As emissões projetadas de CO_2 da infraestrutura de combustível fóssil existente, sem abatimento adicional, excederiam o orçamento de carbono remanescente em 1,5ºC (50%) *(alta confiança). {2.3, 3.1, 3.3, Tabela 3.1}*

B.5.1 Do ponto de vista da ciência física, limitar o aquecimento global causado pelo homem a um nível específico requer limitar as emissões acumuladas de CO_2, atingindo pelo menos emissões líquidas zero de CO_2, juntamente com robustas reduções em outras emissões de gases de efeito estufa. Atingir emissões líquidas zero de GEE requer principalmente reduções profundas de emissões de CO_2, metano e outros GEE, e implica em emissões líquidas negativas de CO_2[39]. A remoção de dióxido de carbono (CDR) será necessária para atingir emissões líquidas negativas de CO_2 (consulte B.6). Projeta-se que as emissões líquidas zero de GEE, se mantidas, resultem em um declínio gradual nas temperaturas da superfície global, após pico anterior. *(alta confiança) {3.1.1,3.3.1,3.3.2,3.3.3, Tabela 3.1, Caixa de Seção Transversal.1}*

B.5.2 Para cada 1000 $GtCO_2$ emitidos pela atividade humana, a temperatura da superfície global aumenta 0,45ºC (melhor estimativa, com uma faixa *provável* de 0,27ºC a 0,63ºC). As melhores estimativas dos orçamentos de carbono remanescentes desde o início de 2020 são 500 $GtCO_2$ para uma probabilidade de 50% de limitar o aquecimento global a 1,5ºC e 1150 $GtCO_2$ para uma probabilidade de 67% de limitar o aquecimento a 2ºC[40]. Quanto mais robustas forem as reduções das emissões de gases que não o CO_2, menores serão as temperaturas

[39] Emissões líquidas zero de GEE definidas pelo potencial de aquecimento global de 100 anos. Consulte a nota de rodapé 9.

[40] Bancos de dados globais fazem escolhas diferentes sobre quais emissões e remoções que ocorrem no solo são consideradas antropogênicas. A maioria dos países relatam, em seus Inventários Nacionais de GEE, seus fluxos antropogênicos de CO_2 terrestres, incluindo os fluxos devidos a mudanças ambientais causadas pelo homem (por exemplo, fertilização por CO_2) em terras 'manejadas'. Utilizando estimativas de emissões baseadas nesses inventários, os orçamentos de carbono remanescentes devem ser reduzidos de forma correspondente. {3.3.1}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 37

resultantes para um determinado orçamento de carbono remanescente ou maior será o orçamento de carbono remanescente para o mesmo nível de mudança de temperatura[41]. {*3.3.1*}

B.5.3 Se as emissões anuais de CO_2 entre 2020-2030 permanecessem, em média, no mesmo nível de 2019, as emissões acumuladas resultantes quase esgotariam o orçamento de carbono remanescente para 1,5ºC (50%) e esgotariam mais de um terço do orçamento de carbono remanescente para 2ºC (67%). As estimativas de futuras emissões de CO_2 de infraestruturas de combustíveis fósseis existentes sem abatimento adicional[42] já excedem o orçamento de carbono remanescente para limitar o aquecimento a 1,5ºC (50%) *(alta confiança).* As futuras emissões acumuladas de CO_2 projetadas ao longo do tempo de vida útil das infraestruturas de combustíveis fósseis existentes e planejadas, se os padrões históricos de operação forem mantidos e sem abatimento adicional[43], são aproximadamente iguais ao orçamento de carbono remanescente para limitar o aquecimento a 2ºC com uma probabilidade de 83%[44] (*alta confiança). {2.3.1, 3.3.1, Figura 3.5}*

B.5.4 Com base apenas em estimativas centrais, as emissões líquidas acumuladas históricas de CO_2 entre 1850 e 2019 totalizam cerca de quatro-quintos[45] do orçamento total de carbono para uma probabilidade de 50% de limitar o aquecimento global a 1,5ºC (estimativa central de cerca de 2.900 $GtCO_2$), e cerca de dois terços[46] do orçamento total de carbono para uma probabilidade de 67% de limitar o aquecimento global a 2ºC (estimativa central de cerca de 3.550 $GtCO_2$). *{3.3.1, Figura 3.5}*

Trajetórias de Mitigação

B.6 Todas as trajetórias globais modeladas que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada, e aquelas que limitam o aquecimento a 2ºC (>67%), envolvem reduções rápidas e profundas e, na maioria dos casos, imediatas das emissões de gases de efeito estufa em todos os setores nesta década. As emissões globais líquidas zero de CO_2 são atingidas para essas categorias de trajetórias no início da década de 2050 e por volta do início da década de 2070, respectivamente. *(alta confiança) {3.3, 3.4, 4.1, 4.5, Tabela 3.1} (Figura SPM.5, Caixa SPM.T)*

B.6.1 As trajetórias globais modeladas fornecem informações sobre como limitar o aquecimento a diferentes níveis; essas trajetórias, em particular seus aspectos setoriais e regionais, dependem dos pressupostos descritos na Caixa SPM.1. As trajetórias modeladas globais que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada ou até 2ºC (>67%) são caracterizadas por reduções profundas, rápidas e, na maioria dos casos, imediatas das emissões de GEE. As trajetórias que limitam o aquecimento a 1,5 ºC (> 50%) sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada atingem emissões líquidas zero de CO_2 no início da década de 2050, seguido por emissões líquidas negativas de CO_2. Essas trajetórias que atingem emissões líquidas zero de GEE o fazem por volta da década de 2070. As trajetórias que limitam o aquecimento a 2 ºC (>67%) atingem emissões líquidas zero de CO_2 no início da década de 2070. As emissões globais de GEE são projetadas para atingir o pico entre 2020 e, o mais tardar, antes de 2025 em trajetórias modeladas globais que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada e naquelas que limitam o aquecimento a 2ºC (>67%), assumindo uma ação imediata. (*alta confiança) {3.3.2,3.3.4,4.1, Tabela 3.1, Figura 3.6} (Tabela SPM.1)*

41 Por exemplo, os orçamentos de carbono remanescentes podem ser de 300 ou 600 $GtCO_2$ para 1,5ºC (50%), respectivamente para emissões que não de CO_2 altas e baixas, em comparação com 500 $GtCO_2$ no caso central. {3.3.1}

42 A redução aqui se refere a intervenções humanas que reduzem a quantidade de gases de efeito estufa que são liberados da infraestrutura de combustíveis fósseis para a atmosfera.

43 Ibid.

44 O WGI fornece orçamentos de carbono que estão de acordo com a limitação do aquecimento global aos limites de temperatura com diferentes possibilidades, tais como 50%, 67% ou 83%. *{3.3.1}*

45 As incertezas para os orçamentos totais de carbono não foram avaliadas e podem afetar as frações específicas calculadas.

46 Ibid.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 38

Tabela SPM.1: Reduções das emissões de gases de efeito estufa e CO_2 de 2019, mediana e percentis 5-95. *{3.3.1, 4.1, Tabela 3.1, Figura 2.5, Caixa SPM.1}*

		Reduções dos níveis de emissão de 2019 (%)			
		2030	2035	2040	2050
Limitar o aquecimento a 1,5ºC (>50%), sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada	GEE:	43 [34-60]	60 [49-77]	69 [58-90]	84 [73-98]
	CO_2	48 [36-69]	65 [50-96]	80 [61-109]	99 [79-119]
Limitar o aquecimento a 2ºC (>67%)	GEE:	21 [1-42]	35 [22-55]	46 [34-63]	64 [53-77]
	CO_2	22 [1-44]	37 [21-59]	51 [36-70]	73 [55-90]

B.6.2 Atingir emissões líquidas zero de CO_2 ou GEE requer principalmente reduções profundas e rápidas das emissões brutas de CO_2, bem como reduções substanciais das emissões de GEE que não o CO_2 *(alta confiança).* Por exemplo, em trajetórias modeladas que limitam o aquecimento a 1,5ºC (> 50%) sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada, as emissões globais de metano são reduzidas em 34 [21-57] % até 2030 em relação a 2019. No entanto, algumas emissões residuais de GEE difíceis de reduzir (por exemplo, algumas emissões da agricultura, aviação, navegação e processos industriais) permanecem e precisariam ser contrabalançadas pela implantação de métodos de CDR para atingir emissões líquidas zero de CO_2 ou GEE (*alta confiança).* Como resultado, atinge-se as emissões líquidas zero de CO_2 antes das emissões líquidas zero GEE (*alta confiança). {3.3.2,3.3.3, Tabela 3.1, Figura 3.5*} *(Figura SPM.5)*

B.6.3 As trajetórias globais de mitigação modeladas que atingem emissões líquidas zero de CO_2 e GEE incluem a transição de combustíveis fósseis sem captura e armazenamento de carbono (CCS) para fontes de energia de muito baixo ou zero carbono, tais como energias renováveis ou combustíveis fósseis com CCS, medidas voltadas para a demanda e melhoria da eficiência, reduzindo as emissões de GEE que não o CO_2 e CDR[47]. Na maioria das trajetórias globais modeladas, a mudança no uso do solo e a silvicultura (via reflorestamento e redução do desmatamento) e o setor de fornecimento de energia atingem emissões líquidas zero de CO_2 antes dos setores de edifícios, indústria e transporte. (*alta confiança) {3.3.3, 4.1,4.5, Figura 4.1} (Figura SPM.5, Caixa SPM.1)*

B.6.4 As opções de mitigação geralmente possuem sinergias com outros aspectos do desenvolvimento sustentável, mas algumas opções também podem ter *trade-offs*. Existem sinergias potenciais entre desenvolvimento sustentável e, por exemplo, eficiência energética e energia renovável. Da mesma forma, dependendo do contexto[48], métodos biológicos de CDR como reflorestamento, manejo florestal aprimorado, sequestro de carbono no solo, restauração de turfeiras e gestão do carbono azul costeiro podem aumentar a biodiversidade e as funções do ecossistema, empregos e meios de subsistência locais. No entanto, o reflorestamento ou a produção de culturas de biomassa podem ter impactos socioeconômicos e ambientais adversos, inclusive na biodiversidade, segurança alimentar e hídrica, meios de subsistência locais e direitos dos Povos Indígenas, especialmente se implementados em grande escala e onde a estrutura fundiária é insegura. Trajetórias modeladas que assumem o uso de recursos de forma mais eficiente ou que direcionam o desenvolvimento global para a sustentabilidade incluem menos desafios, como menor dependência de CDR e pressão sobre o solo e biodiversidade. (*alta confiança) {3.4.1}*

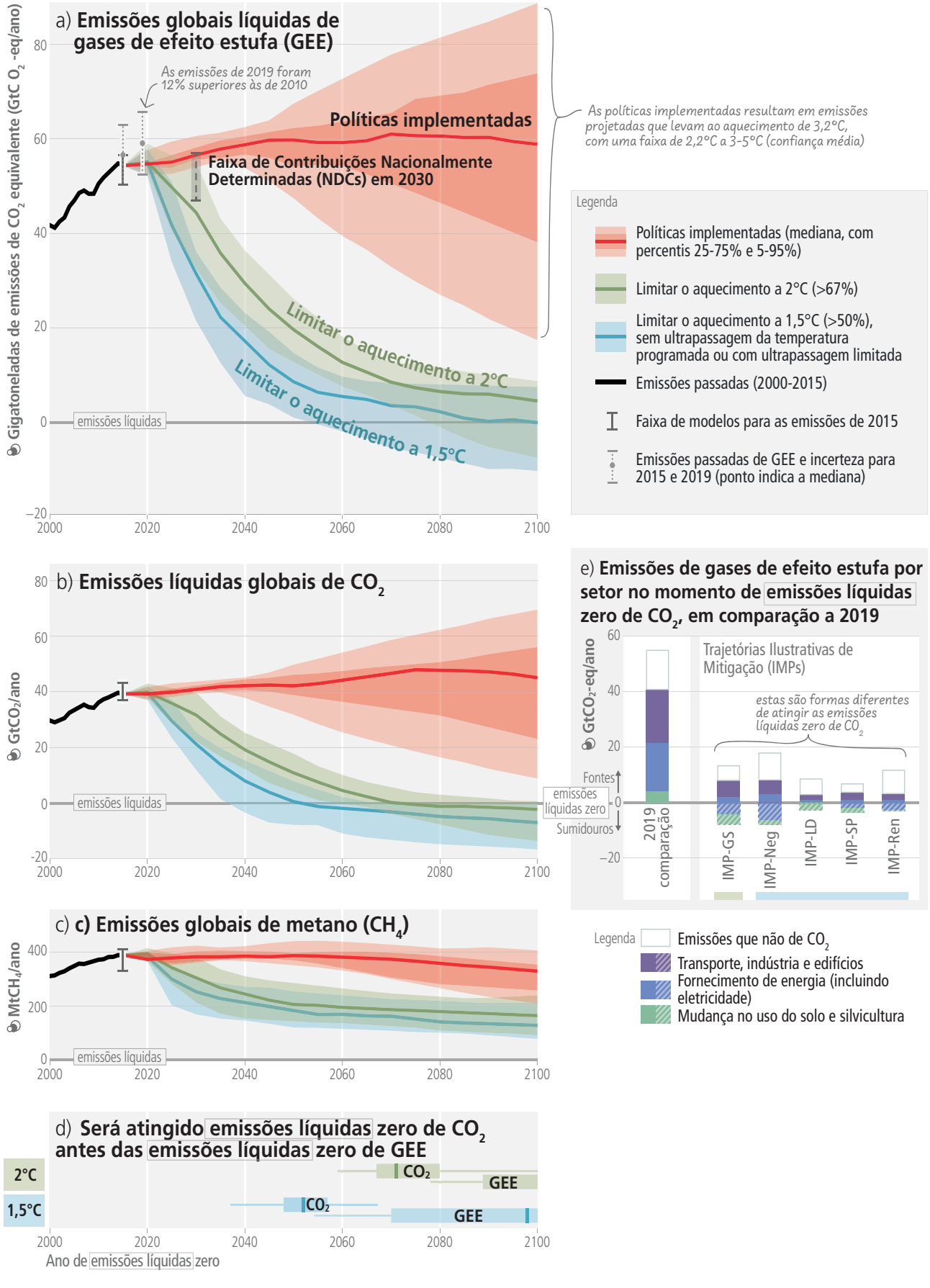
[47] A CCS é uma opção para reduzir as emissões provenientes de fontes de energia fóssil em larga escala e de fontes industriais, desde que haja armazenamento geológico disponível. Quando o CO_2 é capturado diretamente da atmosfera (DACCS), ou da biomassa (BECCS), a CCS fornece o componente de armazenamento destes métodos de CDR. A captura de CO_2 e a injeção subsuperficial é uma tecnologia madura para o processamento de gás e melhor recuperação de petróleo. Ao contrário do setor de petróleo e gás, a CCS é menos madura no setor de energia, bem como na produção de cimento e produtos químicos, onde é uma opção crítica de mitigação. Estima-se que a capacidade técnica de armazenamento geológico seja da ordem de 1000 GtCO2, o que é mais do que as necessidades de armazenamento de CO_2 até 2100 para limitar o aquecimento global a 1,5ºC, embora a disponibilidade regional de armazenamento geológico possa ser um fator limitante. Se o local de armazenamento geológico for adequadamente selecionado e gerenciado, estima-se que o CO_2 possa ser permanentemente isolado da atmosfera. A implementação da CCS enfrenta atualmente barreiras tecnológicas, econômicas, institucionais, ecológicas, ambientais e socioculturais. Atualmente, as taxas globais de implantação da CCS estão muito abaixo daquelas das trajetórias modeladas, limitando o aquecimento global a 1,5ºC a 2ºC. Condições favoráveis, como instrumentos políticos, maior apoio público e inovação tecnológica poderiam reduzir essas barreiras. *(alta confiança) {3.3.3}*

[48] Os impactos, riscos e cobenefícios da implantação de CDR para ecossistemas, biodiversidade e pessoas serão altamente variáveis dependendo do método, contexto específico do local, implementação e escala *(alta confiança).*

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 39

Limitar o aquecimento a 1,5°C e 2°C envolve reduções rápidas, profundas e, na maioria dos casos, imediatas das emissões de gases de efeito estufa

É possível atingir emissões líquidas zero de CO_2 e de GEE por meio de robustas reduções em todos os setores



Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 40

Figura SPM.5: Trajetórias de emissões globais consistentes com políticas implementadas e estratégias de mitigação. Os painéis (a), (b) e **(c)** mostram o desenvolvimento das emissões globais de GEE, CO_2 e metano em trajetórias modeladas, enquanto o **painel (d)** mostra o tempo associado de quando se atinge as emissões líquidas zero de GEE e CO_2. As faixas coloridas denotam o 5º ao 95º percentil nas trajetórias modeladas globais que se enquadram em uma determinada categoria, conforme descrito na Caixa SPM.1. As faixas vermelhas representam as trajetórias de emissões assumindo políticas que foram implementadas até o final de 2020. As faixas de trajetórias modelados que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada são mostrados em azul claro (categoria C1) e trajetórias que limitam o aquecimento a 2ºC (>67%) são mostrados em verde (categoria C3). As trajetórias de emissões globais que limitariam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada e que também atingiriam emissões líquidas zero de GEE na segunda metade do século, o fariam entre 2070-2075. **O painel (e)** mostra as contribuições setoriais de fontes e sumidouros de emissões de CO_2 e que não de CO_2 no momento em que se atinge as emissões líquidas zero de CO_2 em trajetórias ilustrativas de mitigação (IMPs) consistentes com a limitação do aquecimento a 1,5ºC com alta confiança em relação às emissões líquidas negativas (IMP-Neg) ("alta ultrapassagem"), alta eficiência de recursos (IMP-LD), foco no desenvolvimento sustentável (IMP-SP), renováveis (IMP-Ren) e limitação do aquecimento a 2ºC com mitigação menos rápida inicialmente seguida por um fortalecimento gradual (IMP-GS). As emissões positivas e negativas de diferentes IMPs são comparadas com as emissões de GEE do ano de 2019. O fornecimento de energia (incluindo eletricidade) inclui bioenergia com captura e armazenamento de dióxido de carbono e captura e armazenamento direto de dióxido de carbono no ar. As emissões de CO_2 decorrentes da mudança no uso do solo e da silvicultura só podem ser apresentadas como um número líquido, pois muitos modelos não relatam emissões e sumidouros dessa categoria separadamente. *{Figura 3.6, 4.1} (Caixa SPM.1)*

Ultrapassagem: Exceder um Nível de Aquecimento e Retornar

B.7 Se o aquecimento exceder um nível especificado, como 1,5ºC, poderá ser gradualmente reduzido novamente, atingindo e sustentando emissões globais líquidas negativas de CO_2. Isso exigiria implantação adicional de remoção de dióxido de carbono, em comparação com trajetórias sem ultrapassagem, levando a maiores preocupações de viabilidade e sustentabilidade. A ultrapassagem implica impactos adversos, alguns irreversíveis, e riscos adicionais para os sistemas humanos e naturais, que aumentam com a magnitude e a duração da ultrapassagem. *(alta confiança) {3.1, 3.3, 3.4, Tabela 3.1, Figura 3.6}*

B.7.1 Apenas um pequeno número das trajetórias modeladas globais mais ambiciosas limita o aquecimento global a 1,5ºC (>50%) até 2100 sem exceder este nível temporariamente. Atingir e manter emissões líquidas globais negativas de CO_2, com taxas anuais de CDR maiores que as emissões residuais de CO_2, reduziria gradualmente o nível de aquecimento novamente *(alta confiança).* Impactos adversos ocorridos durante este período de ultrapassagem e causadores de um aquecimento adicional por meio de mecanismos de feedback, como o aumento de incêndios florestais, mortalidade em massa de árvores, seca de turfeiras e derretimento do permafrost, enfraquecendo os sumidouros naturais de carbono do solo e aumentando as emissões de GEE, tornariam o retorno mais desafiador *(confiança média). {3.3.2, 3.3.4, Tabela 3.1, Figura 3.6} (Caixa SPM.1)*

B.7.2 Quanto maior a magnitude e a duração da ultrapassagem, mais os ecossistemas e as sociedades estarão expostos a mudanças maiores e mais generalizadas nos fatores de impacto climático, aumentando os riscos para muitos sistemas naturais e humanos. Em comparação com trajetórias sem ultrapassagem, as sociedades enfrentariam maiores riscos à infraestrutura, assentamentos costeiros de baixa altitude e meios de subsistência associados. Ultrapassar 1,5ºC resultará em impactos adversos irreversíveis em certos ecossistemas de baixa resiliência, tais como ecossistemas polares, de montanha e costeiros, impactados pelo derretimento das geleiras e calotas de gelo ou pela aceleração e elevação do nível do mar. (*alta confiança) {3.1.2,3.3.4}*

B.7.3 Quanto maior a ultrapassagem, mais emissões líquidas negativas de CO_2 seriam necessárias para retornar a 1,5ºC até 2100. A transição mais rápida para emissões líquidas zero de CO_2 e a redução mais rápida das emissões que não de CO_2, como o metano, limitariam os níveis de pico de aquecimento e reduziriam a necessidade de emissões líquidas negativas de CO_2, reduzindo assim as preocupações de viabilidade e sustentabilidade e os riscos sociais e ambientais associados a implantação de CDR em grandes escalas. (*alta confiança) {3.3.3,3.3.4,3.4.1, Tabela 3.1}*

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 41

C. Respostas a Curto Prazo

Urgência da Ação Climática Integrada no Curto Prazo

C.1 A mudança do clima é uma ameaça ao bem-estar humano e à saúde planetária *(confiança muito alta)*. Há uma janela de oportunidade que se fecha rapidamente para assegurar um futuro viável e sustentável para todos *(confiança muito alta)*. O desenvolvimento resiliente ao clima integra a adaptação e a mitigação para promover o desenvolvimento sustentável para todos e é possibilitado pelo aumento da cooperação internacional, incluindo melhor acesso a recursos financeiros adequados, particularmente para regiões, setores e grupos vulneráveis, bem como governança inclusiva e políticas coordenadas *(alta confiança)*. As escolhas e ações implementadas nesta década terão impactos agora e por milhares de anos *(alta confiança). {3.1,3.3,4.1,4.2,4.3, 4.4,4.7,4.8,4.9, Figura 3.1, Figura 3.3, Figura 4.2} (Figura SPM.1, Figura SPM.6)*

C.1.1 Evidências de impactos adversos observados e perdas e danos relacionados, riscos projetados, níveis e tendências em vulnerabilidade e limites de adaptação demonstram que a ação mundial de desenvolvimento resiliente ao clima é mais urgente do que avaliado anteriormente no AR5. O desenvolvimento resiliente ao clima integra a adaptação e a mitigação dos GEE para promover o desenvolvimento sustentável para todos. As trajetórias de desenvolvimento resilientes ao clima têm sido limitadas pelo desenvolvimento, emissões e mudança do clima do passado e são progressivamente limitadas por cada incremento de aquecimento, em particular além de 1,5°C *(confiança muito alta) {3.4,3.4.2,4.1}*

C.1.2 As ações do governo nos níveis subnacional, nacional e internacional, com a sociedade civil e setor privado, desempenham um papel crucial em possibilitar e acelerar mudanças nas trajetórias de desenvolvimento em direção à sustentabilidade e desenvolvimento resiliente ao clima *(confiança muito alta)*. O desenvolvimento resiliente ao clima é possível quando os governos, a sociedade civil e o setor privado fazem escolhas de desenvolvimento inclusivas que priorizam a redução de riscos, equidade e justiça, e quando os processos de tomada de decisão, financiamento e ações são integrados em todos os níveis de governança, setores e horizontes temporais *(confiança muito alta)*. As condições facilitadoras são diferenciadas por circunstâncias e geografias nacionais, regionais e locais, de acordo com as capacidades, e incluem: compromisso político e acompanhamento, políticas coordenadas, cooperação social e internacional, gestão do ecossistema, governança inclusiva, diversidade de conhecimento, inovação tecnológica, monitoramento e avaliação e melhor acesso a recursos financeiros adequados, especialmente para regiões, setores e comunidades vulneráveis *(alta confiança). {3.4,4.2,4.4,4.5,4.7,4.8} (Figura SPM.6)*

C.1.3 As emissões contínuas afetarão ainda mais todos os principais componentes do sistema climático, e muitas mudanças serão irreversíveis em escalas centenárias a milenares e se tornarão maiores com o aumento do aquecimento global. Sem ações de mitigação e adaptação urgentes, eficazes e equitativas, as mudanças do clima ameaçam cada vez mais os ecossistemas, a biodiversidade e os meios de subsistência, saúde e bem-estar das gerações atuais e futuras. *(alta confiança) {3.1.3,3.3.3,3.4.1, Figura 3.4, 4.1,4.2,4.3,4.4} (Figura SPM.1, Figura SPM.6)*

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 42

Há uma janela de oportunidade que se estreita rapidamente para permitir um desenvolvimento resiliente ao clima

Múltiplas escolhas e ações que interajam entre si podem mudar as trajetórias do desenvolvimento em direção à sustentabilidade

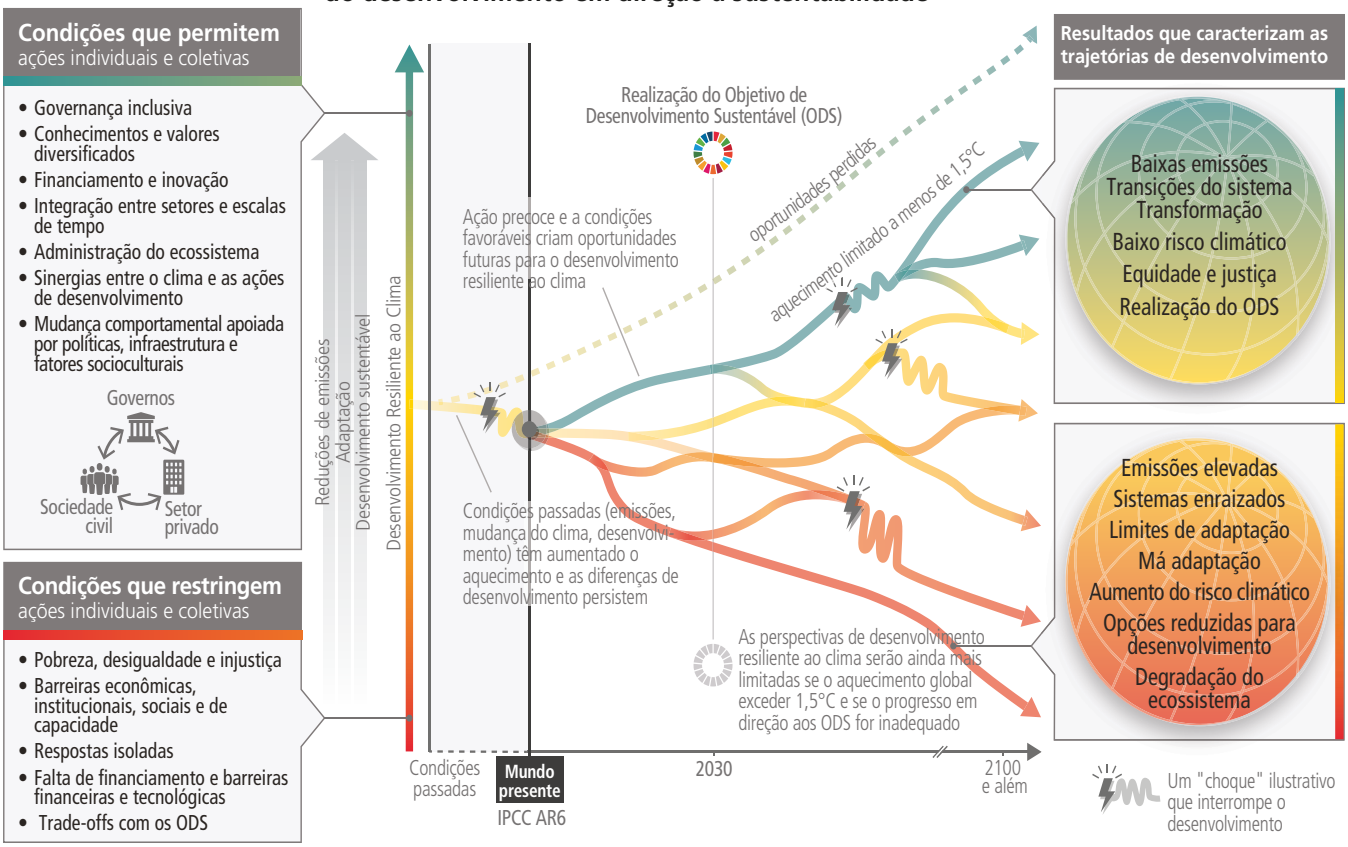


Figura SPM.6: As trajetórias ilustrativas de desenvolvimento (vermelho a verde) e os resultados associados (painel direito) mostram que existe uma janela de oportunidade que rapidamente se fecha para garantir um futuro habitável e sustentável para todos. O desenvolvimento resistente ao clima é o processo de implementação de medidas de mitigação de gases de efeito estufa e de adaptação para apoiar o desenvolvimento sustentável. As trajetórias divergentes ilustram que as escolhas e ações interativas feitas por diversos atores do governo, do setor privado e da sociedade civil podem fazer avançar o desenvolvimento resiliente ao clima, mudar as trajetórias em direção à sustentabilidade e permitir menores emissões e adaptação. Diversos conhecimentos e valores incluem valores culturais, Conhecimento Indígena, conhecimento local e conhecimento científico. Eventos climáticos e não climáticos, tais como secas, enchentes ou pandemias, representam choques mais severos em trajetórias com menor desenvolvimento resiliente ao clima (vermelho a amarelo) do que em trajetórias com maior desenvolvimento resiliente ao clima (verde). Há limites de adaptação e capacidade de adaptação para alguns sistemas humanos e naturais ao aquecimento global de 1,5ºC, e com cada aumento de aquecimento, perdas e danos irão aumentar. As trajetórias de desenvolvimento adotadas pelos países em todos os estágios do desenvolvimento econômico impactam as emissões de GEE e os desafios e oportunidades de mitigação, que variam entre os países e regiões. As trajetórias e oportunidades de ação são moldadas por ações prévias (ou inações e oportunidades perdidas, trajetória tracejada), e condições favoráveis e restritivas (painel esquerdo), e ocorrem no contexto de riscos climáticos, limites de adaptação e diferenças de desenvolvimento. Quanto mais se posterga as reduções de emissões, mais reduzidas são as opções eficazes de adaptação. *{Figura 4.2, 3.1,3.2, 3.4, 4.2, 4.4, 4.5, 4.6, 4.9}*

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 43

Benefícios da Ação de Curto Prazo

C.2 A mitigação profunda, rápida e sustentada e a implementação acelerada de ações de adaptação nesta década reduziriam as perdas e danos projetados para humanos e ecossistemas *(confiança muito alta)* e proporcionariam muitos cobenefícios, especialmente para a qualidade do ar e saúde *(alta confiança).* Ações atrasadas de mitigação e adaptação levariam à manutenção de infraestruturas de altas emissões, aumentariam os riscos de ativos ociosos e a escalada de custos, reduziriam a viabilidade e aumentariam as perdas e danos *(alta confiança).* Ações de curto prazo envolvem altos investimentos iniciais e mudanças potencialmente disruptivas que podem ser atenuadas por uma série de políticas facilitadoras *(alta confiança). {2.1, 2.2, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8}*

C.2.1 A mitigação profunda, rápida e sustentada e a implementação acelerada de ações de adaptação nesta década reduziriam perdas e danos futuros relacionados à mudança do clima para humanos e ecossistemas *(confiança muito alta).* Como as opções de adaptação muitas vezes têm longos períodos de implementação, a implementação acelerada de adaptação nesta década é importante para diminuir as lacunas da adaptação. (*alta confiança).* Respostas abrangentes, eficazes e inovadoras que integram adaptação e mitigação podem aproveitar as sinergias e reduzir os *trade-offs* entre adaptação e mitigação (*alta confiança). {4.1,4.2,4.3}*

C.2.2 A ação de mitigação atrasada aumentará ainda mais o aquecimento global, com um aumento das perdas e danos e os sistemas humanos e naturais adicionais atingindo os limites de adaptação. Os desafios decorrentes de ações de adaptação e mitigação atrasadas incluem o risco de escalada de custos, bloqueio de infraestrutura, ativos ociosos e viabilidade e eficácia reduzidas das opções de adaptação e mitigação. Sem mitigação rápida, profunda e sustentada e ações de adaptação aceleradas, as perdas e danos continuarão aumentando, incluindo impactos adversos projetados na África, LDCs, SIDS, América Central e do Sul[49], Ásia e Ártico, afetando desproporcionalmente as populações mais vulneráveis. *(alta confiança) {2.1.2,3.1.2,3.2,3.3.1,3.3.3, 4.1, 4.2, 4.3} (Figura SPM.3, Figura SPM.4)*

C.2.3 A ação climática acelerada também pode fornecer cobenefícios (consulte também C.4) (*alta confiança).* Muitas ações de mitigação trariam benefícios para a saúde por meio de menor poluição do ar, mobilidade ativa (por exemplo, caminhada, ciclismo) e mudanças para dietas saudáveis sustentáveis (*alta confiança*). Reduções robustas, rápidas e sustentadas nas emissões de metano podem limitar o aquecimento no curto prazo e melhorar a qualidade do ar, reduzindo o ozônio da superfície global *(alta confiança).* A adaptação pode gerar vários benefícios adicionais, como melhoria da produtividade agrícola, inovação, saúde e bem-estar, segurança alimentar, subsistência e conservação da biodiversidade *(confiança muito alta). {4.2,4.5.4,4.5.5,4.6}*

C.2.4 A análise de custo-benefício permanece limitada em sua capacidade de representar todos os danos evitados pela mudança do clima *(alta confiança).* Os benefícios econômicos para a saúde humana decorrentes da melhoria da qualidade do ar, resultantes das ações de mitigação, podem ser da mesma ordem de grandeza que os custos de mitigação, e potencialmente ainda maiores *(confiança média).* Mesmo sem contabilizar todos os benefícios de se evitar danos potenciais, o benefício econômico e social global de limitar o aquecimento global a 2°C excede os custos de mitigação na maior parte da literatura avaliada *(confiança média)*[50]. A mitigação mais rápida da mudança do clima, com picos de emissões mais cedo, aumenta os cobenefícios e reduz os riscos e custos de viabilidade no longo prazo, mas requer maiores investimentos iniciais (*alta confiança). {3.4.1,4.2}*

C.2.5 Trajetórias de mitigação ambiciosas implicam mudanças grandes e às vezes disruptivas nas estruturas econômicas existentes, com consequências distributivas significativas dentro de e entre os países. Para acelerar a ação climática, as consequências adversas dessas mudanças podem ser moderadas por reformas fiscais, financeiras, institucionais e regulamentares e pela integração das ações climáticas nas políticas macroeconômicas, por meio de: i) pacotes para toda a economia, consistentes com as circunstâncias nacionais, apoiando trajetórias de crescimento sustentável de baixa emissão; ii) redes de segurança e proteção social resilientes ao clima; e iii) melhor acesso ao financiamento para infraestruturas e tecnologias de baixa emissão, especialmente nos países em desenvolvimento. (*alta confiança) {4.2,4.4,4.7,4.8.1}*

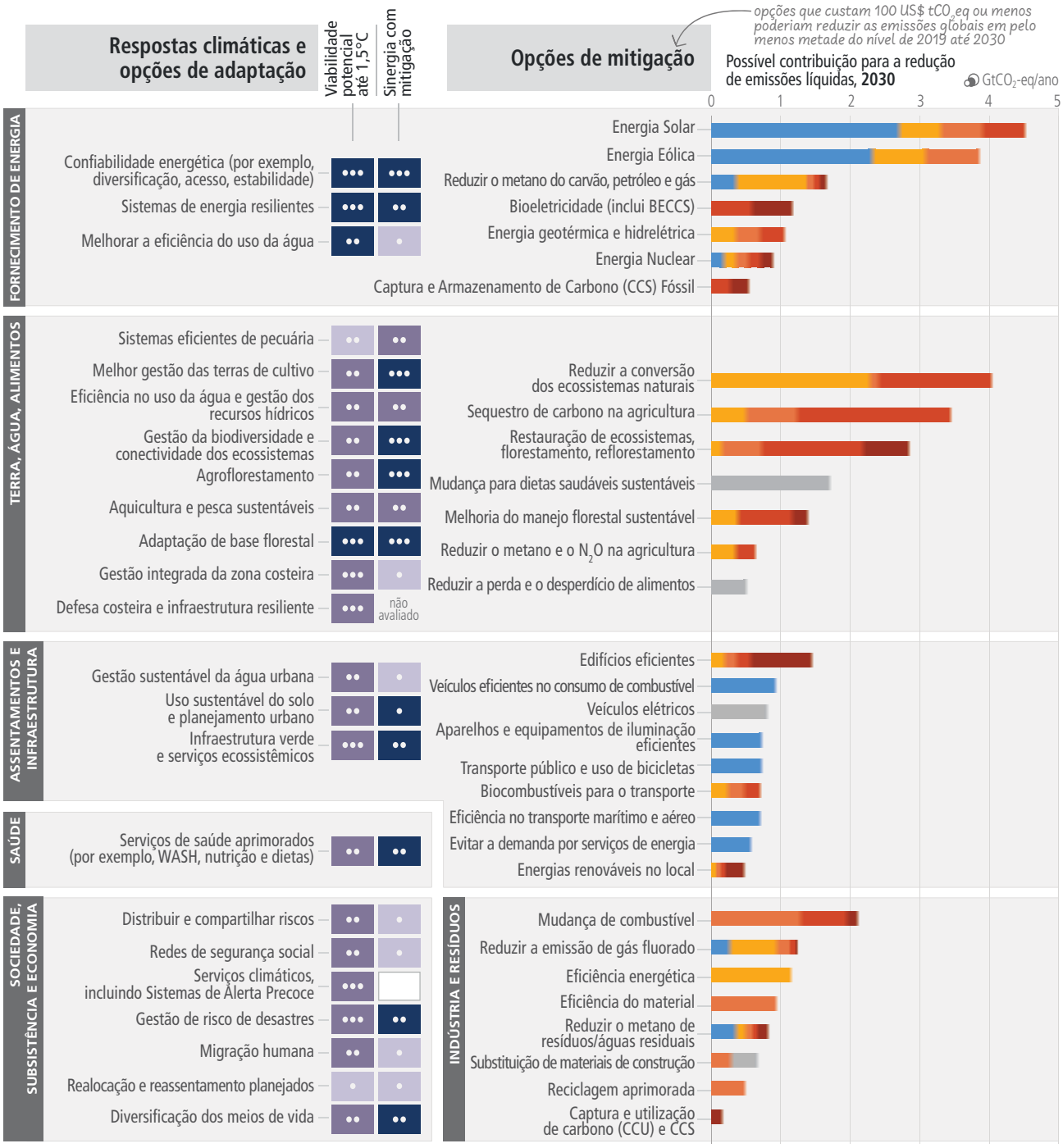
[49] A parte sul do México está incluída na sub-região climática da América Central do Sul (SCA) para o WGI. O México é avaliado como parte da América do Norte para o WGII. A literatura sobre a mudança do clima para a região da SCA ocasionalmente inclui o México e, nesses casos, a avaliação do WGII faz referência à América Latina. O México é considerado parte da América Latina e do Caribe para o WGIII.

[50] As evidências são muito limitadas para fazer uma conclusão robusta semelhante para limitar o aquecimento a 1,5°C. Limitar o aquecimento global a 1,5°C ao invés de 2°C aumentaria os custos de mitigação, mas também aumentaria os benefícios em termos de redução de impactos e riscos relacionados e redução das necessidades de adaptação *(alta confiança).*

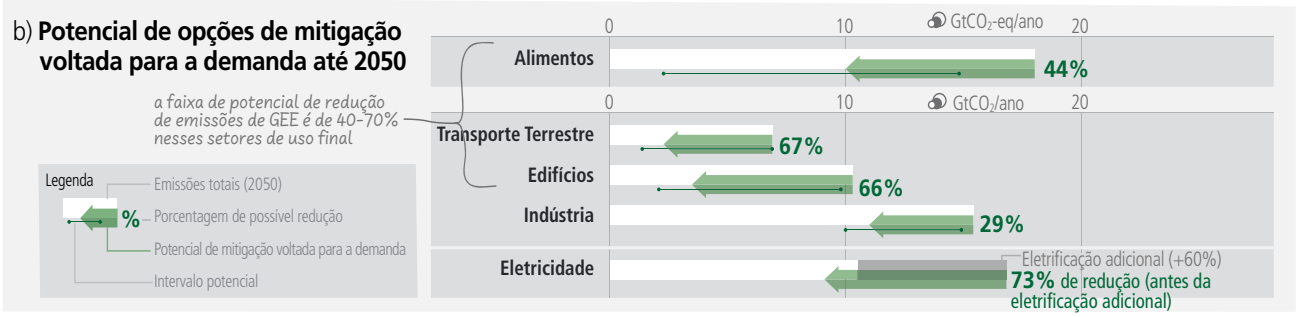
Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 44

Há múltiplas oportunidades para ampliar a ação climática.

a) Viabilidade das respostas climáticas e adaptação, e potencial de opções de mitigação no curto prazo



b) Potencial de opções de mitigação voltada para a demanda até 2050



Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 45

Figura SPM.7: Múltiplas oportunidades para ampliar a ação climática. O painel (a) apresenta opções selecionadas de mitigação e adaptação por diferentes sistemas. O lado esquerdo do painel (a) mostra respostas climáticas e opções de adaptação avaliadas por sua viabilidade multidimensional em escala global no curto prazo e até 1,5°C de aquecimento global. Como a literatura acima de 1,5°C é limitada, a viabilidade em níveis mais altos de aquecimento pode mudar, o que atualmente não é possível avaliar de forma robusta. O termo resposta é utilizado aqui adicionalmente à adaptação porque algumas respostas, tais como migração, realocação e reassentamento, podem ou não ser consideradas adaptação. A adaptação de base florestal inclui manejo florestal sustentável, conservação e restauração florestal, reflorestamento e florestamento. WASH se refere a água, saneamento e higiene. Seis dimensões de viabilidade (econômica, tecnológica, institucional, social, ambiental e geofísica) foram utilizadas para calcular a viabilidade potencial das respostas climáticas e opções de adaptação, juntamente com suas sinergias com a mitigação. Para potenciais de viabilidade e dimensões de viabilidade, a figura mostra a viabilidade alta, média ou baixa. As sinergias com a mitigação são identificadas como altas, médias e baixas. O lado direito do painel (a) fornece uma visão geral das opções de mitigação selecionadas e seus custos e potenciais estimados em 2030. Os custos são os custos monetários líquidos descontados durante toda a vida útil das emissões de GEE evitadas, calculados em relação a uma tecnologia de referência. Os potenciais e custos relativos variam conforme o lugar, contexto e tempo e a longo prazo, em comparação com 2030. O potencial (eixo horizontal) é a redução líquida de emissões de GEE (soma das emissões reduzidas e/ou sumidouros aprimorados) dividida em categorias de custo (segmentos de barras coloridas) em relação a uma linha de base de emissões que consiste nos cenários de referência da política atual (por volta de 2019) do banco de dados de cenários do AR6. Os potenciais são avaliados de forma independente para cada opção e não são aditivos. As opções de mitigação do sistema de saúde estão incluídas principalmente em assentamentos e infraestrutura (por exemplo, edifícios eficientes de saúde) e não podem ser identificadas separadamente. A mudança de combustível na indústria se refere à mudança para eletricidade, hidrogênio, bioenergia e gás natural. Transições de cores graduais indicam divisão incerta em categorias de custo devido à incerteza ou forte dependência do contexto. A incerteza no potencial total é tipicamente de 25-50%. O **Painel (b)** mostra o potencial indicativo das opções de mitigação pela demanda para 2050. Os potenciais são estimados com base em aproximadamente 500 estudos *bottom-up* representativos de todas as regiões globais. A base (barra branca) é fornecida pela média setorial de emissões de GEE em 2050 dos dois cenários (IEA-STEPS (Agência Internacional de Energia-Cenário de Políticas Declaradas) e IP_ModAct (Trajetória Ilustrativa Ação Moderada)) consistente com as políticas anunciadas pelos governos nacionais até 2020. A flecha verde representa o potencial de redução de emissões pela demanda. A faixa em potencial é mostrada por uma linha de pontos de conexão que exibe o maior e o menor potencial relatado na literatura. Os alimentos mostram o potencial pela demanda de fatores socioculturais e do uso da infraestrutura, bem como mudanças nos padrões de uso do solo possibilitadas pela mudança na demanda de alimentos. Medidas voltadas para a demanda e novas formas de prestação de serviços de uso final podem reduzir as emissões globais de GEE nos setores de uso final (edifícios, transporte terrestre, alimentos) em 40-70% até 2050, em comparação com os cenários base, enquanto algumas regiões e grupos socioeconômicos exigem energia e recursos adicionais. A última linha mostra como as opções de mitigação pela demanda em outros setores podem influenciar a demanda geral de eletricidade. A barra cinza escura mostra o aumento projetado na demanda de eletricidade acima da base de 2050 devido à crescente eletrificação nos outros setores. Com base em uma avaliação *bottom-up*, este aumento projetado na demanda de eletricidade pode ser evitado mediante opções de mitigação pela demanda nos domínios do uso de infraestrutura e fatores socioculturais que influenciam o uso de eletricidade na indústria, transporte terrestre e edifícios (flecha verde). *{Figura 4.4}*

Opções de Mitigação e Adaptação entre Sistemas

C.3 Transições rápidas e de longo alcance em todos os setores e sistemas são necessárias para alcançar reduções de emissões profundas e sustentadas e garantir um futuro viável e sustentável para todos. Estas transições de sistema envolvem um aumento significativo de um amplo portfólio de opções de mitigação e adaptação. Opções viáveis, eficazes e de baixo custo para mitigação e adaptação já estão disponíveis, com diferenças entre sistemas e regiões. *(alta confiança) {4.1, 4.5, 4.6} (Figura SPM.7)*

C.3.1 A mudança sistêmica necessária para atingir reduções rápidas e profundas das emissões e adaptação transformadora à mudança do clima não tem precedentes em termos de escala, mas não necessariamente em termos de velocidade *(confiança média).* As transições de sistemas incluem: implantação de tecnologias de baixa ou zero emissão; redução e alteração da demanda por meio de design e acesso de infraestrutura, mudanças socioculturais e comportamentais e maior eficiência e adoção tecnológica; proteção social, serviços climáticos ou outros serviços; e proteção e restauração de ecossistemas *(alta confiança).* Opções viáveis, eficazes e de baixo custo para mitigação e adaptação já estão disponíveis (*alta confiança).* A disponibilidade, viabilidade e potencial das opções de mitigação e adaptação no curto prazo diferem entre sistemas e regiões *(confiança muito alta). {4.1,4.5.1 a 4.5.6} (Figura SPM.7)*

Sistemas de Energia

C.3.2 Sistemas de energia de emissões líquidas zero de CO_2 implicam: redução substancial no uso geral de combustíveis fósseis, uso mínimo de combustíveis fósseis não abatidos[51] e uso de captura e armazenamento de carbono nos sistemas de combustíveis fósseis remanescentes; sistemas elétricos que não emitem CO_2 líquido; eletrificação generalizada; portadores de energia alternativos em aplicações menos passíveis de eletrificação; conservação e eficiência energética; e maior integração em todo o sistema de energia (*alta confiança).* Grandes contribuições para reduções das emissões com custos inferiores a US$ 20 tCO_2-eq $^{-1}$ advêm de energia solar e eólica, melhorias de eficiência energética e reduções das emissões de metano (mineração de carvão, petróleo e gás, resíduos) *(confiança média).* Existem opções de adaptação viáveis que apoiam a resiliência da infraestrutura, sistemas de energia confiáveis e uso eficiente da água para sistemas de geração de energia existentes e novos *(confiança muito alta).* A diversificação da geração de energia (por exemplo, via eólica, solar, hidrelétrica em pequena escala) e a gestão da demanda (por exemplo, armazenamento e melhorias na eficiência energética) podem aumentar a confiabilidade energética e reduzir as vulnerabilidades à mudança do clima (*alta confiança).* Mercados de energia responsivos ao clima, padrões de projeto atualizados sobre ativos energéticos conforme a mudança do clima atual e projetada, tecnologias de redes inteligentes, sistemas de transmissão robustos e maior capacidade de resposta a déficits de fornecimento têm alta viabilidade a médio e longo prazo, com cobenefícios de mitigação *(confiança muito alta). {4.5.1} (Figura SPM.7)*

[51] Neste contexto, "combustíveis fósseis não abatidos" se refere aos combustíveis fósseis produzidos e utilizados sem intervenções que reduzam substancialmente a quantidade de GEE emitida ao longo do ciclo de vida; por exemplo, capturando 90% ou mais de CO_2 de usinas elétricas, ou 50-80% das emissões fugitivas de metano do fornecimento de energia.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 46

Indústria e Transporte

C.3.3 A redução das emissões de GEE da indústria envolve uma ação coordenada em todas as cadeias de valor para promover todas as opções de mitigação, incluindo gestão da demanda, eficiência energética e de materiais, fluxos circulares de materiais, bem como tecnologias de redução e mudanças transformacionais nos processos de produção *(alta confiança).* Nos transportes, biocombustíveis sustentáveis, hidrogênio de baixa emissão e derivados (incluindo amônia e combustíveis sintéticos) podem apoiar a mitigação das emissões de CO_2 do transporte marítimo, aéreo e terrestre pesado, mas exigem melhorias no processo de produção e reduções de custos *(confiança média).* Os biocombustíveis sustentáveis podem oferecer benefícios adicionais de mitigação no transporte terrestre a curto e médio prazo *(confiança média).* Os veículos elétricos movidos a eletricidade com baixas emissões de GEE têm grande potencial para reduzir as emissões de GEE do transporte terrestre, com base no ciclo de vida útil (*alta confiança).* Os avanços nas tecnologias de baterias podem facilitar a eletrificação de caminhões pesados e complementar os sistemas ferroviários elétricos convencionais (*confiança média).* A pegada ambiental da produção de baterias e as crescentes preocupações com minerais críticos podem ser abordadas via estratégias de diversificação de materiais e suprimentos, melhorias na eficiência energética e material, e fluxos circulares de materiais *(confiança média). {4.5.2,4.5.3} (Figura SPM.7)*

Cidades, Assentamentos e Infraestrutura

C.3.4 Os sistemas urbanos são críticos para atingir reduções profundas das emissões e promover o desenvolvimento resiliente ao clima (*alta confiança).* Os principais elementos de adaptação e mitigação nas cidades incluem considerar os impactos e riscos da mudança do clima (por exemplo, através de serviços climáticos) na concepção e planejamento de assentamentos e infraestruturas; o planejamento do uso do solo para se atingir uma forma urbana compacta, a colocalização de empregos e habitações; o apoio aos transportes públicos e à mobilidade ativa (por exemplo, caminhar e andar de bicicleta); a concepção, construção, reabilitação e utilização eficientes dos edifícios; a redução e alteração do consumo de energia e materiais; a suficiência[52]; a substituição de materiais; e a eletrificação em combinação com fontes de baixa emissão (*alta confiança*). Transições urbanas que oferecem benefícios para a mitigação, adaptação, saúde humana e bem-estar, os serviços ecossistêmicos e a redução da vulnerabilidade para comunidades de baixa renda são promovidos pelo planejamento inclusivo a longo prazo, que adota uma abordagem integrada à infraestrutura física, natural e social (*alta confiança).* A infraestrutura verde/natural e azul apoia a absorção e armazenamento de carbono e, isoladamente ou quando combinada com a infraestrutura cinza, pode reduzir o uso de energia e o risco de eventos extremos, como ondas de calor, enchentes, chuvas intensas e secas, gerando cobenefícios para a saúde, bem-estar e meios de subsistência *(confiança média). {4.5.3}*

Terra, Oceano, Alimentos e Água

C.3.5 Muitas opções de agricultura, floresta e outros usos da terra (AFOLU) fornecem benefícios de adaptação e mitigação que podem ser ampliados no curto prazo na maioria das regiões. A conservação, melhor manejo florestal e restauração de florestas e outros ecossistemas oferecem a maior parcela do potencial de mitigação econômica, com redução do desmatamento em regiões tropicais com o maior potencial total de mitigação. A restauração de ecossistemas, o reflorestamento e o florestamento podem levar a *trade-offs* devido a demandas concorrentes sobre a terra. A minimização de *trade-offs* requer abordagens integradas para atender a múltiplos objetivos, incluindo a segurança alimentar. Medidas voltadas para a demanda (mudança para dietas[53] saudáveis e sustentáveis e redução de perdas/resíduos de alimentos) e intensificação agrícola sustentável podem reduzir a conversão de ecossistemas e as emissões de metano e óxido nitroso e liberar solos para reflorestamento e restauração do ecossistema. Produtos agrícolas e florestais de fonte sustentável, incluindo produtos de madeira de longa vida, podem ser usados em vez de produtos com maior intensidade de GEE em outros setores. As opções eficazes de adaptação incluem melhorias nos cultivos, sistemas agroflorestais, adaptação baseada na comunidade, diversificação agrícola e paisagística e agricultura urbana. Estas opções de resposta de AFOLU requerem a integração de fatores biofísicos, socioeconômicos e outros fatores habilitadores. Algumas opções, como a conservação de ecossistemas com alto teor de carbono (por exemplo, turfeiras, pântanos, serras, manguezais e florestas), oferecem benefícios imediatos, enquanto outras, como a restauração de ecossistemas de alto carbono, levam décadas para gerar resultados mensuráveis. (*alta confiança) {4.5.4} (Figura SPM.7)*

C.3.6 A manutenção da resiliência da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos em escala global depende da conservação efetiva e equitativa de aproximadamente 30 a 50% do solo, água doce e áreas oceânicas da Terra, incluindo atualmente ecossistemas quase naturais (*alta confiança).* A conservação, proteção e restauração dos ecossistemas terrestres, de água doce, costeiros e oceânicos, juntamente com um

[52] Um conjunto de medidas e práticas diárias que evitam a demanda de energia, materiais, solo e água enquanto proporcionam bem-estar humano para todos dentro dos limites do planeta. {4.5.3}

[53] "Dietas saudáveis e sustentáveis" promovem todas as dimensões da saúde e bem-estar dos indivíduos; possuem baixa pressão e impacto ambiental; são acessíveis, baratas, seguras e equitativas; e são culturalmente aceitáveis, conforme descrito na FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura) e OMS. O conceito relacionado de "dietas balanceadas" se refere a dietas que incluem alimentos de origem vegetal, como aquelas baseadas em cereais secundários, legumes, frutas e verduras, castanhas e sementes, e alimentos de origem animal produzidos em sistemas resilientes, sustentáveis e com baixas emissões de GEE, conforme descrito no SRCCL.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 47

manejo direcionado para se adaptar aos impactos inevitáveis da mudança do clima, reduz a vulnerabilidade da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos à mudança do clima *(alta confiança),* reduz a erosão costeira e inundações *(alta confiança)* e pode aumentar a absorção e armazenamento de carbono se o aquecimento global for limitado *(confiança média).* A recuperação das áreas de pesca superexploradas ou esgotadas reduz os impactos negativos da mudança do clima no setor pesqueiro *(confiança média)* e apoia a segurança alimentar, biodiversidade, saúde humana e bem-estar (*alta confiança).* A restauração do solo contribui para a mitigação e adaptação à mudança do clima com sinergias por meio de serviços ecossistêmicos aprimorados e com retornos economicamente positivos e cobenefícios para a redução da pobreza e melhoria dos meios de subsistência (*alta confiança).* A cooperação e a tomada de decisões inclusivas com os Povos Indígenas e comunidades locais, bem como o reconhecimento dos direitos inerentes dos Povos Indígenas, são essenciais para a adaptação e mitigação bem-sucedidas em florestas e outros ecossistemas (*alta confiança). {4.5.4,4.6} (Figura SPM.7)*

Saúde e Nutrição

C.3.7 A saúde humana se beneficiará de opções integradas de mitigação e adaptação que incorporam a saúde na alimentação, infraestrutura, proteção social e políticas hídricas *(confiança muito alta).* Há opções eficazes de adaptação para ajudar a proteger a saúde e bem-estar humanos, incluindo: fortalecer os programas de saúde pública relacionados a doenças sensíveis ao clima, aumentar a resiliência dos sistemas de saúde, melhorar a saúde do ecossistema, melhorar o acesso à água potável, reduzir a exposição dos sistemas de água e saneamento a enchentes, melhorar os sistemas de vigilância e de alerta precoce, desenvolver vacinas *(confiança muito alta),* melhorar o acesso aos cuidados de saúde mental e Planos de Ação para Saúde no Calor que incluem sistemas de alerta precoce e de resposta *(confiança alta).* As estratégias de adaptação que reduzem a perda e o desperdício de alimentos ou apoiam regimes alimentares saudáveis, equilibrados e sustentáveis contribuem para a nutrição, saúde, biodiversidade e outros benefícios ambientais (*alta confiança*). {*4.5.5*} (*Figura SPM.7*)

Sociedade, Meios de Subsistência e Economias

C.3.8 Combinação de políticas que incluem seguro climático e de saúde, proteção social e redes de segurança social adaptativas, financiamento contingente e fundos de reserva, e acesso universal a sistemas de alerta precoce combinados com planos de contingência eficazes, podem reduzir a vulnerabilidade e a exposição dos sistemas humanos. Gestão de riscos de desastres, sistemas de alerta precoce, serviços climáticos e abordagens de disseminação e compartilhamento de riscos possuem ampla aplicabilidade em todos os setores. O aumento da educação, incluindo capacitação, alfabetização climática e informações fornecidas por meio de serviços climáticos e abordagens comunitárias, podem facilitar uma maior percepção aos riscos e acelerar mudanças comportamentais e planejamento. (*alta confiança) {4.5.6}*

Sinergias e *Trade-Offs* com o Desenvolvimento Sustentável

C.4 A ação acelerada e equitativa na mitigação e adaptação aos impactos da mudança do clima é fundamental para o desenvolvimento sustentável. As ações de mitigação e adaptação têm mais sinergias do que *trade-offs* com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. As sinergias e *trade-offs* dependem do contexto e da escala de implementação. *(alta confiança) {3.4, 4.2, 4.4, 4.5, 4.6, 4.9, Figura 4.5}*

C.4.1 Os esforços de mitigação embutidos no contexto mais amplo de desenvolvimento podem aumentar o ritmo, a profundidade e a amplitude das reduções das emissões (*confiança média*). Os países em todos os estágios do desenvolvimento econômico procuram melhorar o bem-estar das pessoas, e suas prioridades de desenvolvimento refletem diferentes pontos de partida e contextos. Os diferentes contextos incluem, mas não se limitam, a circunstâncias sociais, econômicas, ambientais, culturais, políticas, dotação de recursos, capacidades, ambiente internacional e desenvolvimento anterior *(alta confiança).* Em regiões com alta dependência de combustíveis fósseis para, entre outras coisas, geração de receita e emprego, a mitigação dos riscos para o desenvolvimento sustentável requer políticas que promovam a diversificação econômica e do setor energético e considerações de princípios, processos e práticas de transições justas (*alta confiança).* A erradicação da pobreza extrema, pobreza energética e a garantia de padrões de vida decentes em países/regiões com baixas emissões, no contexto da realização dos objetivos de desenvolvimento sustentável, a curto prazo, podem ser atingidas sem um aumento significativo das emissões globais (*alta confiança). {4.4,4.6, Anexo I: Glossário}*

C.4.2 Muitas ações de mitigação e adaptação têm múltiplas sinergias com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e o desenvolvimento sustentável em geral, mas algumas ações também podem ter *trade-offs*. As sinergias potenciais com os ODS excedem os *trade-offs* potenciais; sinergias e *trade-offs* dependem do ritmo e magnitude da mudança e do contexto de desenvolvimento, incluindo desigualdades, com consideração da justiça climática. Os *trade-offs* podem ser avaliados e minimizados dando ênfase à capacitação, financiamento, governança, transferência de tecnologia, investimentos, desenvolvimento, contexto específico baseado em gênero e outras considerações de equidade social com participação significativa de Povos Indígenas, comunidades locais e populações vulneráveis. (*alta confiança) {3.4.1,4.6, Figura 4.5,4.9}*

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 48

C.4.3 A implementação conjunta de ações de mitigação e adaptação, levando em consideração os *trade-offs*, oferece cobenefícios e sinergias para a saúde e bem-estar humanos. Por exemplo, a melhoria do acesso a fontes de energia e tecnologias limpas gera benefícios para a saúde, especialmente para as mulheres e crianças; a eletrificação combinada com energia com baixo teor de GEE e as mudanças para a mobilidade ativa e transportes públicos podem melhorar a qualidade do ar, a saúde e o emprego, bem como garantir a segurança energética e a equidade. *(alta confiança) {4.2,4.5.3,4.5.5,4.6,4.9}*

Equidade e Inclusão

C.5 Priorizar processos de equidade, justiça climática, justiça social, inclusão e transição justa pode permitir ações de adaptação e mitigação ambiciosas e o desenvolvimento resiliente ao clima. Os resultados da adaptação são potencializados por um maior apoio às regiões e às pessoas com maior vulnerabilidade aos riscos climáticos. A integração da adaptação climática aos programas de proteção social melhora a resiliência. Muitas opções estão disponíveis para reduzir o consumo intensivo em emissões, inclusive por meio de mudanças comportamentais e de estilo de vida, com cobenefícios para o bem-estar da sociedade. *(alta confiança) {4.4, 4.5}*

C.5.1 A equidade continua sendo um elemento central no regime climático da ONU, não obstante as mudanças na diferenciação entre os estados ao longo do tempo e os desafios na avaliação de ações justas. Trajetórias de mitigação ambiciosas implicam mudanças grandes e às vezes disruptivas na estrutura econômica, com consequências distributivas significativas dentro de e entre os países. As consequências distributivas dentro de e entre os países incluem a mudança da renda e emprego durante a transição de atividades de altas para baixas emissões. (*alta confiança) {4.4}*

C.5.2 Ações de adaptação e mitigação que priorizam equidade, justiça social, justiça climática, abordagens baseadas em direitos e inclusão levam a resultados mais sustentáveis, reduzem *trade-offs*, apoiam mudanças transformadoras e promovem o desenvolvimento resiliente ao clima. Políticas redistributivas entre setores e regiões que protejam os mais pobres e vulneráveis, redes de segurança social, equidade, inclusão e transições justas, em todas as escalas, podem permitir ambições sociais mais profundas e resolver *trade-offs* com os objetivos de desenvolvimento sustentável. A atenção à equidade e à participação ampla e significativa de todos os atores relevantes na tomada de decisões em todas as escalas pode criar confiança social, baseada no compartilhamento equitativo dos benefícios e ônus da mitigação, que aprofundam e ampliam o apoio a mudanças transformadoras. (*alta confiança) {4.4}*

C.5.3 Regiões e pessoas (3,3 a 3,6 bilhões em número) com consideráveis restrições de desenvolvimento possuem alta vulnerabilidade a riscos climáticos (consulte A.2.2). Os resultados da adaptação para os mais vulneráveis dentro e entre países e regiões são melhorados através de abordagens centradas na equidade, inclusão e abordagens baseadas em direitos. A vulnerabilidade é exacerbada pela desigualdade e marginalização ligadas a, por exemplo, gênero, etnia, baixa renda, assentamentos informais, deficiências, idade e padrões históricos e contínuos de desigualdade, como o colonialismo, especialmente para muitos Povos Indígenas e comunidades locais. A integração da adaptação climática em programas de proteção social, incluindo transferências de dinheiro e programas de obras públicas, é altamente viável e aumenta a resiliência à mudança do clima, especialmente quando apoiada por serviços básicos e infraestrutura. Os maiores ganhos em bem-estar nas áreas urbanas podem ser alcançados priorizando o acesso ao financiamento para reduzir o risco climático para comunidades de baixa renda e marginalizadas, incluindo pessoas que vivem em assentamentos informais. (*alta confiança) {4.4,4.5.3,4.5.5,4.5.6}*

C.5.4 O desenho dos instrumentos regulatórios e econômicos e as abordagens baseadas no consumo podem promover a equidade. Indivíduos com alto status socioeconômico contribuem desproporcionalmente para as emissões e possuem o maior potencial de redução das emissões. Muitas opções estão disponíveis para reduzir o consumo intensivo em emissões e, ao mesmo tempo, melhorar o bem-estar da sociedade. Opções socioculturais, mudanças de comportamento e estilo de vida apoiadas por políticas, infraestrutura e tecnologia podem ajudar os usuários finais a mudarem para um consumo intensivo de baixas emissões, com múltiplos cobenefícios. Uma parte substancial da população em países de baixa emissão não tem acesso a serviços modernos de energia. O desenvolvimento de tecnologia, transferência, capacitação e financiamento podem apoiar os países/regiões em desenvolvimento a dar um salto ou a transicionar para sistemas de transporte de baixa emissão, proporcionando múltiplos cobenefícios. O desenvolvimento resiliente ao clima avança quando os atores trabalham de forma equitativa, justa e inclusiva para conciliar interesses, valores e visões de mundo divergentes, tendo em vista resultados equitativos e justos. (*alta confiança) {2.1,4.4}*

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 49

Governança e Políticas

C.6 A ação climática eficaz é possibilitada pelo compromisso político, governança multinível bem alinhada, estruturas institucionais, leis, políticas, estratégias e maior acesso ao financiamento e à tecnologia. Objetivos claros, coordenação em vários domínios políticos e processos de governança inclusivos facilitam a ação climática eficaz. Instrumentos regulatórios e econômicos podem apoiar reduções profundas das emissões e resiliência climática, se ampliados e aplicados extensivamente. O desenvolvimento resiliente ao clima se beneficia do conhecimento diversificado. *(alta confiança) {2.2, 4.4, 4.5, 4.7}*

C.6.1 A governança climática eficaz permite a mitigação e adaptação. Uma governança eficaz fornece orientações gerais para a definição de objetivos e prioridades e para a integração da ação climática em todos os domínios e níveis políticos, com base nas circunstâncias nacionais e no contexto da cooperação internacional. Ela potencializa o monitoramento e avaliação e a segurança regulatória, priorizando a tomada de decisões inclusivas, transparentes e equitativas, e melhora o acesso ao financiamento e à tecnologia (consulte C.7). *(alta confiança) {2.2.2,4.7}*

C.6.2 Instituições eficazes locais, municipais, nacionais e subnacionais criam consenso para a ação climática entre diversos interesses, permitem a coordenação e informam a definição de estratégias, mas requerem capacidade institucional adequada. O apoio às políticas é influenciado pelos atores da sociedade civil, incluindo as empresas, os jovens, as mulheres, os trabalhadores, a mídia, os Povos Indígenas e as comunidades locais. A eficácia é potencializada pelo compromisso político e por parcerias entre diferentes grupos da sociedade. (*alta confiança) {2.2,4.7}*

C.6.3 A governança multinível eficaz para a mitigação, adaptação, gestão de riscos e desenvolvimento resiliente ao clima é possibilitada por processos de tomada de decisões inclusivas, que dão prioridade à equidade e à justiça no planejamento e implementação, atribuição de recursos adequados, revisão institucional, e monitoramento e avaliação. Vulnerabilidades e riscos climáticos são frequentemente reduzidos por meio de leis, políticas, processos participativos e intervenções cuidadosamente projetados e implementados que abordam desigualdades específicas do contexto, como as baseadas em gênero, etnia, deficiência, idade, localização e renda (*alta confiança*) { *4.4, 4.7* }

C.6.4 Instrumentos regulatórios e econômicos podem apoiar profundas reduções das emissões, se ampliados e aplicados de forma mais extensiva (*alta confiança).* Ampliar e potencializar o uso de instrumentos regulatórios pode melhorar os resultados de mitigação em aplicações setoriais, de acordo com as circunstâncias nacionais (*alta confiança).* Quando implementados, os instrumentos de precificação do carbono incentivaram medidas de redução das emissões de baixo custo, mas foram menos eficazes, por si só e a preços prevalecentes durante o período de avaliação, para promover medidas de custo mais elevado necessárias para reduções adicionais *(confiança média).* Os impactos distributivos e de equidade de tais instrumentos de precificação do carbono, por exemplo, impostos sobre o carbono e comércio de emissões, podem ser abordados utilizando a receita para apoiar famílias de baixa renda, entre outras abordagens. A remoção de subsídios de combustíveis fósseis reduziria as emissões[54] e geraria benefícios como melhoria da receita pública, do desempenho macroeconômico e de sustentabilidade; a remoção de subsídios pode ter impactos distributivos adversos, especialmente nos grupos economicamente mais vulneráveis que, em alguns casos, podem ser mitigados por medidas como a redistribuição da receita economizada, todas as quais dependem das circunstâncias nacionais (*alta confiança).* Pacotes de políticas para toda a economia, como compromissos de gastos públicos e reformas de preços, podem atender aos objetivos econômicos de curto prazo, ao mesmo tempo em que reduzem as emissões e mudam as trajetórias do desenvolvimento em direção à sustentabilidade *(confiança média).* Pacotes de políticas eficazes seriam abrangentes, consistentes, equilibrados entre os objetivos e adaptados às circunstâncias nacionais (*alta confiança). {2.2.2,4.7}*

C.6.5 Com base em diversos conhecimentos e valores culturais, a participação significativa e os processos de envolvimento inclusivos - incluindo o Conhecimento Indígena, conhecimentos locais e conhecimentos científicos - facilitam o desenvolvimento resiliente ao clima, desenvolvem capacidades e permitem soluções localmente adequadas e socialmente aceitáveis. (*alta confiança) {4.4,4.5.6,4.7}*

[54] A remoção do subsídio de combustíveis fósseis é projetada por vários estudos para reduzir as emissões globais de CO_2 em 1 a 4% e as emissões de GEE em até 10% até 2030, variando entre as regiões *(confiança média).*

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 50

Financiamento, Tecnologia e Cooperação Internacional

C.7 O financiamento, a tecnologia e a cooperação internacional são facilitadores críticos para uma ação climática acelerada. Para que as metas climáticas sejam alcançadas, tanto o financiamento para a adaptação quanto o financiamento para a mitigação teriam que aumentar acentuadamente. Há capital global suficiente para fechar as lacunas de investimento global, mas existem barreiras para redirecionar o capital para a ação climática. A melhoria dos sistemas de inovação tecnológica é fundamental para acelerar a adoção generalizada de tecnologias e práticas. A potencialização da cooperação internacional é possível através de múltiplos canais. *(alta confiança) {2.3, 4.8}*

C.7.1 Aprimorar a disponibilidade de e o acesso ao financiamento[55] permitiria a ação climática acelerada *(confiança muito alta).* O atendimento das necessidades e diferenças e a ampliação do acesso equitativo ao financiamento nacional e internacional, quando combinado com outras ações de apoio, pode atuar como um catalisador para acelerar a adaptação e mitigação e permitir o desenvolvimento resiliente ao clima (*alta confiança).* Para que as metas climáticas sejam alcançadas e para enfrentar os riscos crescentes e acelerar os investimentos na redução das emissões, tanto o financiamento da adaptação como o da mitigação teriam que aumentar acentuadamente (*alta confiança). {4.8.1}*

C.7.2 O aumento do acesso ao financiamento pode criar capacidades e abordar os limites flexíveis à adaptação e evitar riscos crescentes, especialmente para países em desenvolvimento, grupos vulneráveis, regiões e setores (*alta confiança).* O financiamento público é um importante facilitador da adaptação e mitigação e pode também alavancar o financiamento privado (*alta confiança).* As necessidades médias anuais modeladas de investimento em mitigação para 2020 a 2030, em cenários que limitam o aquecimento a 2°C ou 1,5°C, são um fator de três a seis vezes maior do que os níveis atuais[56], e os investimentos totais em mitigação (públicos, privados, domésticos e internacionais) teriam que aumentar em todos os setores e regiões *(confiança média).* Mesmo que sejam implementados extensos esforços globais de mitigação, haverá necessidade de recursos financeiros, técnicos e humanos para a adaptação (*alta confiança). {4.3,4.8.1}*

C.7.3 Há capital e liquidez globais suficientes para reduzir as diferenças de investimento global, dado o tamanho do sistema financeiro global, mas existem barreiras para redirecionar o capital para a ação climática tanto dentro como fora do setor financeiro global e no contexto das vulnerabilidades econômicas e do endividamento dos países em desenvolvimento. A redução das barreiras ao financiamento para o aumento dos fluxos financeiros exigiria sinalização e apoio claros por parte dos governos, incluindo um maior alinhamento do financiamento público, a fim de reduzir as barreiras e os riscos reais e percebidos a nível regulatório, de custos e de mercado e melhorar o perfil de risco-retorno dos investimentos. Ao mesmo tempo, dependendo dos contextos nacionais, os atores financeiros, incluindo investidores, intermediários financeiros, bancos centrais e reguladores financeiros, podem alterar a subestimação sistêmica dos riscos relacionados ao clima e reduzir as inconsistências setoriais e regionais entre o capital disponível e as necessidades de investimento. (*alta confiança) {4.8.1}*

C.7.4 Os fluxos financeiros rastreados ficam aquém dos níveis necessários para a adaptação e para atingir as metas de mitigação em todos os setores e regiões. Essas diferenças criam muitas oportunidades e o desafio de reduzir diferenças é maior nos países em desenvolvimento. O apoio financeiro acelerado aos países em desenvolvimento, proveniente dos países desenvolvidos e de outras fontes, é um facilitador crítico para potencializar as ações de adaptação e mitigação e resolver as desigualdades no acesso ao financiamento, incluindo os seus custos, termos e condições, e a vulnerabilidade econômica à mudança do clima para os países em desenvolvimento. Subsídios públicos em escala para mitigação e financiamento de adaptação para regiões vulneráveis, especialmente na África Subsaariana, seriam rentáveis e teriam alto retorno social em termos de acesso à energia básica. As opções para ampliar a mitigação nos países em desenvolvimento incluem: níveis mais altos de financiamento público e fluxos de financiamento privado mobilizados publicamente, dos países desenvolvidos para os países em desenvolvimento, no contexto do objetivo de 100 bilhões de dólares por ano; maior uso de garantias públicas para reduzir os riscos e alavancar os fluxos privados a custos menores; desenvolvimento dos mercados de capitais locais; e construção de maior confiança nos processos de cooperação internacional. Um esforço coordenado para tornar a recuperação pós-pandêmica sustentável a longo prazo pode acelerar a ação climática, inclusive em países e regiões em desenvolvimento enfrentando altos custos de dívida, sobre-endividamento e incerteza macroeconômica. (*alta confiança) {4.8.1}*

[55] O financiamento advém de diversas fontes: públicas ou privadas, locais, nacionais ou internacionais, bilaterais ou multilaterais e fontes alternativas. Pode assumir a forma de subvenções, assistência técnica, empréstimos (concessionais e não concessionais), títulos, ações, seguros de risco e garantias financeiras (de diferentes tipos).

[56] Essas estimativas se baseiam em suposições de cenário.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 51

C.7.5 Potencializar os sistemas de inovação tecnológica pode oferecer oportunidades para diminuir o crescimento das emissões, criar cobenefícios sociais e ambientais e realizar outros ODS. Os pacotes de políticas adaptados aos contextos nacionais e às características tecnológicas têm sido eficazes no apoio à inovação de baixa emissão e à difusão de tecnologia. Políticas públicas podem apoiar a formação e a P&D, complementadas por instrumentos regulatórios e baseados no mercado que criem incentivos e oportunidades de mercado. A inovação tecnológica pode ter *trade-offs*, como novos e maiores impactos ambientais, desigualdades sociais, dependência excessiva de conhecimentos e provedores estrangeiros, impactos distributivos e efeitos rebote[57], exigindo governança e políticas apropriadas para aumentar o potencial e reduzir os *trade-offs*. A inovação e a adoção de tecnologias de baixa emissão é atrasada na maioria dos países em desenvolvimento, particularmente nos menos desenvolvidos, devido em parte às condições favoráveis mais deficitárias, incluindo financiamento, desenvolvimento e transferência de tecnologia e capacitação limitados. *(alta confiança) {4.8.3}*

C.7.6 A cooperação internacional é um facilitador crítico para atingir uma mitigação ambiciosa da mudança do clima, adaptação e desenvolvimento resiliente ao clima (*alta confiança).* O desenvolvimento resiliente ao clima é possibilitado pela maior cooperação internacional, incluindo a mobilização e melhoria do acesso ao financiamento, particularmente para os países em desenvolvimento, regiões, setores e grupos vulneráveis e o alinhamento dos fluxos financeiros para que a ação climática seja consistente com os níveis de ambição e as necessidades de financiamento (*alta confiança*). Melhorar a cooperação internacional relativa ao financiamento, tecnologia e capacitação pode permitir uma maior ambição e pode atuar como um catalisador para acelerar a mitigação e adaptação e mudar as trajetórias de desenvolvimento em direção à sustentabilidade (*alta confiança).* Isso inclui suporte a NDCs e aceleração do desenvolvimento e implantação de tecnologia (*alta confiança).* As parcerias transnacionais podem estimular o desenvolvimento de políticas, difusão de tecnologia, adaptação e mitigação, embora ainda permaneçam incertezas sobre seus custos, viabilidade e eficácia *(confiança média).* Acordos, instituições e iniciativas internacionais ambientais e setoriais estão ajudando e, em alguns casos, podem ajudar a estimular investimentos com baixas emissões de GEE e a reduzir as emissões *(confiança média). {2.2.2,4.8.2}*

[57] Levando a menores reduções das emissões líquidas ou mesmo aumentos das emissões.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 53

Mudança do Clima 2023
Relatório Síntese

Este Relatório Síntese deve ser citado como:
IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: *Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Seção 1
Introdução

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 56

1. Introdução

Este Relatório Síntese (SYR) do Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC resume o nível do conhecimento sobre a mudança do clima, seus impactos e riscos amplamente propagados, e a mitigação e adaptação à mudança do clima, com base na literatura científica, técnica e socioeconômica revisada por pares desde a publicação do Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC em 2014.

A avaliação é realizada no contexto do cenário internacional em evolução, em particular, os desenvolvimentos no processo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC), incluindo os resultados do Protocolo de Quioto e a adoção do Acordo de Paris. Ela reflete a crescente diversidade das pessoas envolvidas na ação climática.

Este relatório integra as principais conclusões dos relatórios do Grupo de Trabalho AR6[1] e dos três Relatórios Especiais AR6[2]. Tal relatório reconhece a interdependência entre clima, ecossistemas e biodiversidade e sociedades humanas; o valor de formas diversas de conhecimento; e as estreitas interligações entre adaptação à mudança do clima, mitigação, saúde dos ecossistemas, bem-estar humano e desenvolvimento sustentável. Com base em múltiplas estruturas analíticas, incluindo as das ciências físicas e sociais, este relatório identifica oportunidades de ação transformadora que são efetivas, viáveis, justas e equitativas, utilizando conceitos de transições de sistemas e trajetórias de desenvolvimento resilientes[3]. Diferentes esquemas de classificação regional[4] são utilizados para aspectos físicos, sociais e econômicos, refletindo a literatura subjacente.

Após esta introdução, a Seção 2, "*Situação e Tendências Atuais*", é iniciada com a avaliação de evidências observacionais para nosso clima em mudança, os fatores históricos e atuais agentes causadores da mudança do clima induzida pelo ser humano, bem como seus impactos. A implementação atual das opções de resposta para adaptação e mitigação também é avaliada. A seção 3, "*Perspectivas de Clima e de Desenvolvimento no Longo Prazo*", fornece uma avaliação no longo prazo da mudança do clima até 2100 e mais além em uma ampla gama de perspectivas socioeconômicas. Ela considera características no longo prazo, impactos, riscos e custos em trajetórias de adaptação e mitigação no contexto do desenvolvimento sustentável. A seção 4, "*Respostas no Curto Prazo para um Clima em Transformação*", avalia as oportunidades para ampliar ações efetivas no período até 2040, no contexto das promessas e compromissos climáticos e da busca do desenvolvimento sustentável.

Com base no entendimento científico, as principais descobertas podem ser formuladas como declarações de fatos ou associadas a um nível de confiança avaliado usando a linguagem calibrada do IPCC[5]. As descobertas científicas são extraídas dos relatórios subjacentes e surgem de seu Sumário para Formuladores de Políticas (doravante SPM), Sumário Técnico (doravante TS) e capítulos subjacentes, que são indicados por colchetes {}. A Figura 1.1 mostra a Legenda de Figuras do Relatório Síntese, um guia para ícones visuais usados em diversas figuras neste relatório.

1 As três contribuições do Grupo de Trabalho ao AR6 são: Mudança do Clima 2021: Base das Ciências Físicas; Mudança do Clima 2022: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade; e Mudança do Clima 2022: Mitigação da Mudança do Clima, respectivamente. Suas avaliações abrangem a literatura científica aceita para publicação, respectivamente, até 31 de janeiro de 2021, 1º de setembro de 2021 e 11 de outubro de 2021.

2 Os três Relatórios Especiais são: Aquecimento Global de 1,5ºC (2018): um Relatório Especial do IPCC sobre os impactos do aquecimento global de 1,5ºC acima dos níveis pré-industriais e as trajetórias relacionadas às emissões globais de gases de efeito estufa, no contexto do fortalecimento da resposta global à ameaça da mudança do clima, do desenvolvimento sustentável e dos esforços para erradicar a pobreza (SR1. 5); Mudança do Clima e Terra (2019): um Relatório Especial do IPCC sobre mudança do clima, desertificação, degradação da terra, manejo sustentável da terra, segurança alimentar e fluxos de gases de efeito estufa em ecossistemas terrestres (SRCCL); e O Oceano e a Criosfera em um Clima em Transformação (2019) (SROCC). Os Relatórios Especiais abrangem a literatura científica aceita para publicação, respectivamente, até 15 de maio de 2018, 7 de abril de 2019 e 15 de maio de 2019.

3 O Glossário (Anexo I) inclui definições desses e de outros termos e conceitos usados neste relatório, extraídos do Glossário do Grupo de Trabalho Conjunto do AR6.

4 Dependendo do contexto das informações climáticas, as regiões geográficas no AR6 podem se referir a áreas maiores, como subcontinentes e regiões oceânicas, ou a regiões tipológicas, como regiões de monções, costas, cadeias montanhosas ou cidades. Um novo conjunto de regiões terrestres e oceânicas de referência AR6 WGI 1.4.5, WGI 10.1, WGI 11.9, WGI 12.1–12.4, WGI Atlas.1.3.3–1.3.4. O WGIII aloca países a regiões geográficas, com base na Classificação da Divisão Estatística da ONU.

5 Cada descoberta é fundamentada em uma avaliação de evidências e acordos subjacentes. Um nível de confiança é expresso por meio de cinco qualificadores: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, e indicado em itálico, por exemplo, ***confiança média***. Os termos a seguir foram usados para indicar a probabilidade avaliada de um desempenho ou resultado: virtualmente certa 99–100% de probabilidade; muito provável 90–100%; provável 66–100%; mais provável do que improvável >50–100%; tanto provável quanto improvável 33–66%; improvável 0–33%; muito improvável 0–10%; e excepcionalmente improvável 0–1%. Termos adicionais (extremamente provável 95–100%; e extremamente improvável 0–5%) também são usados quando apropriado. A probabilidade avaliada também é indicada em itálico: por exemplo, *muito provável*. Isso é consistente com o AR5. Neste Relatório, salvo indicação em contrário, são usados colchetes [x a y] para fornecer a faixa *muito provável* avaliada ou intervalo de 90%.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 57



Figura 1.1: Legenda das figuras do Relatório Síntese.

Seção 2
Situação Atual e Tendências

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 60

Seção 2: Situação Atual e Tendências

2.1 Mudanças Observadas, Impactos e Atribuições

As atividades humanas, principalmente através das emissões de gases de efeito estufa, inequivocamente causaram o aquecimento global, com a temperatura da superfície global atingindo um valor 1,1°C mais alto entre 2011-2020 do que no período de 1850-1900. As emissões globais de gases de efeito estufa continuaram a aumentar no período de 2010 a 2019, com contribuições históricas e correntes desiguais decorrentes do uso insustentável de energia, do uso da terra e da mudança no uso da terra, dos estilos de vida e dos padrões de consumo e produção entre regiões, entre países e dentro deles, e entre indivíduos *(alta confiança)*. As mudanças do clima causadas pelo homem já estão afetando muitos extremos meteorológicos e climáticos em todas as regiões do mundo. Isso levou a impactos adversos difundidos na segurança alimentar e hídrica, na saúde humana, na economia e na sociedade, bem como perdas e danos relacionados[6] à natureza e às pessoas *(alta confiança)*. As comunidades vulneráveis que historicamente menos contribuíram para a mudança do clima atual são desproporcionalmente afetadas *(alta confiança)*.

2.1.1. Aquecimento Observado e suas Causas

A temperatura da superfície global foi cerca de 1,1°C mais alta entre 2011–2020 do que entre 1850–1900 (1,09°C [0,95°C– 1,20°C])[7], com aumentos maiores sobre a terra (1,59 [1,34 a 1,83]°C) do que sobre o oceano (0,88°C [0,68°C– 1,01°C])[8]. O aquecimento observado é causado pelo ser humano, com aquecimento por gases de efeito estufa (GEE), dominado por CO_2 e metano (CH_4), parcialmente mascarado pelo resfriamento por aerossol (Figura 2.1). A temperatura da superfície global nas duas primeiras décadas do século 21 (2001-2020) foi 0,99 [0,84 a 1,10]°C mais alta que em 1850-1900. A temperatura da superfície global aumentou mais rapidamente desde 1970 do que em qualquer outro período de 50 anos durante pelo menos os últimos 2000 anos (*alta confiança*). A faixa *provável* de aumento da temperatura total da superfície global causada pelo ser humano de 1850–1900 a 2010–2019[9] é de 0,8°C a 1,3°C, com uma melhor estimativa de 1,07°C. É *provável* que os GEE[10] misturados de forma homogênea ("*well-mixed*") tenham contribuído para um aquecimento de 1,0°C–2,0°C, e outros agentes causadores de origem humana (principalmente aerossóis) contribuíram para um resfriamento de 0,0°C–0,8°C, agentes causadores de origens naturais (solares e vulcânicos) mudaram a temperatura da superfície global em ±0,1°C e a variabilidade interna a mudou em ±0,2°C. {WGI SPM A.1, WGI SPM A.1.2, WGI SPM A.1.3, WGI SPM A.2.2, WGI Figura SPM.2; SRCCL TS.2}

Os aumentos observados nas concentrações de GEE misturados de forma homogênea desde cerca de 1750 são inequivocamente causados pelas emissões de GEE provenientes de atividades humanas. Os sumidouros terrestres e oceânicos absorveram, com diferenças regionais, uma proporção quase constante (globalmente, cerca de 56% ao ano) das emissões de CO_2 das atividades humanas nas últimas seis décadas (*alta confiança*). Em 2019, as concentrações atmosféricas de CO_2 atingiram 410 partes por milhão (ppm), o CH_4 atingiu 1866 partes por bilhão (ppb) e o óxido nitroso (N_2O) atingiu 332 ppb[11]. Outros grandes contribuidores para o aquecimento são o ozônio troposférico (O_3) e os gases halogenados. As concentrações de CH_4 e N_2O aumentaram para níveis sem precedentes em pelo menos 800.000 anos (*confiança muito alta*), e há uma *alta confiança* de que as concentrações atuais de CO_2 são mais altas do que em qualquer momento durante pelo menos os últimos dois milhões de anos. Desde 1750, os aumentos nas concentrações de CO_2 (47%) e CH_4 (156%) excedem em muito – e os aumentos em N_2O (23%) são semelhantes – às mudanças naturais multimilenares entre períodos glaciais e interglaciais ao longo de pelo menos 800.000 anos (*confiança muito alta*). O efeito de resfriamento líquido que surge dos aerossóis antropogênicos atingiu seu auge no final do século XX (*alta confiança*). {WGI SPM A1.1, WGI SPM A1.3, WGI SPM A.2.1, WGI Figura SPM.2, WGI TS 2.2, WGI 2ES, WGI Figura 6.1}

---

6 Neste relatório, o termo "perdas e danos" refere-se a impactos adversos observados e/ou riscos projetados e pode ser econômico e/ou não econômico. (Consulte o Anexo I: Glossário)

7 O aumento estimado na temperatura da superfície global desde o AR5 é devido principalmente ao aquecimento posterior desde 2003–2012 (+0,19 [0,16 a 0,22]°C). Além disso, avanços metodológicos e novos conjuntos de dados proporcionaram uma representação espacial mais completa das mudanças na temperatura da superfície, inclusive no Ártico. Estas e outras melhorias também aumentaram a estimativa da mudança da temperatura da superfície global em aproximadamente 0,1°C, mas este aumento não representa um aquecimento físico adicional desde o AR5 {WGI SPM A1.2 e nota de rodapé 10}.

8 Para 1850–1900 a 2013–2022, os cálculos atualizados são 1,15°C [1,00°C–1,25°C] para a temperatura da superfície global, 1,65°C [1,36°C– 1.90°C] para temperaturas terrestres e 0,93°C [0,73°C–1,04°C] para temperaturas oceânicas acima de 1850–1900 usando, exatamente, os mesmos conjuntos de dados (atualizados por 2 anos) e métodos empregados no WGI.

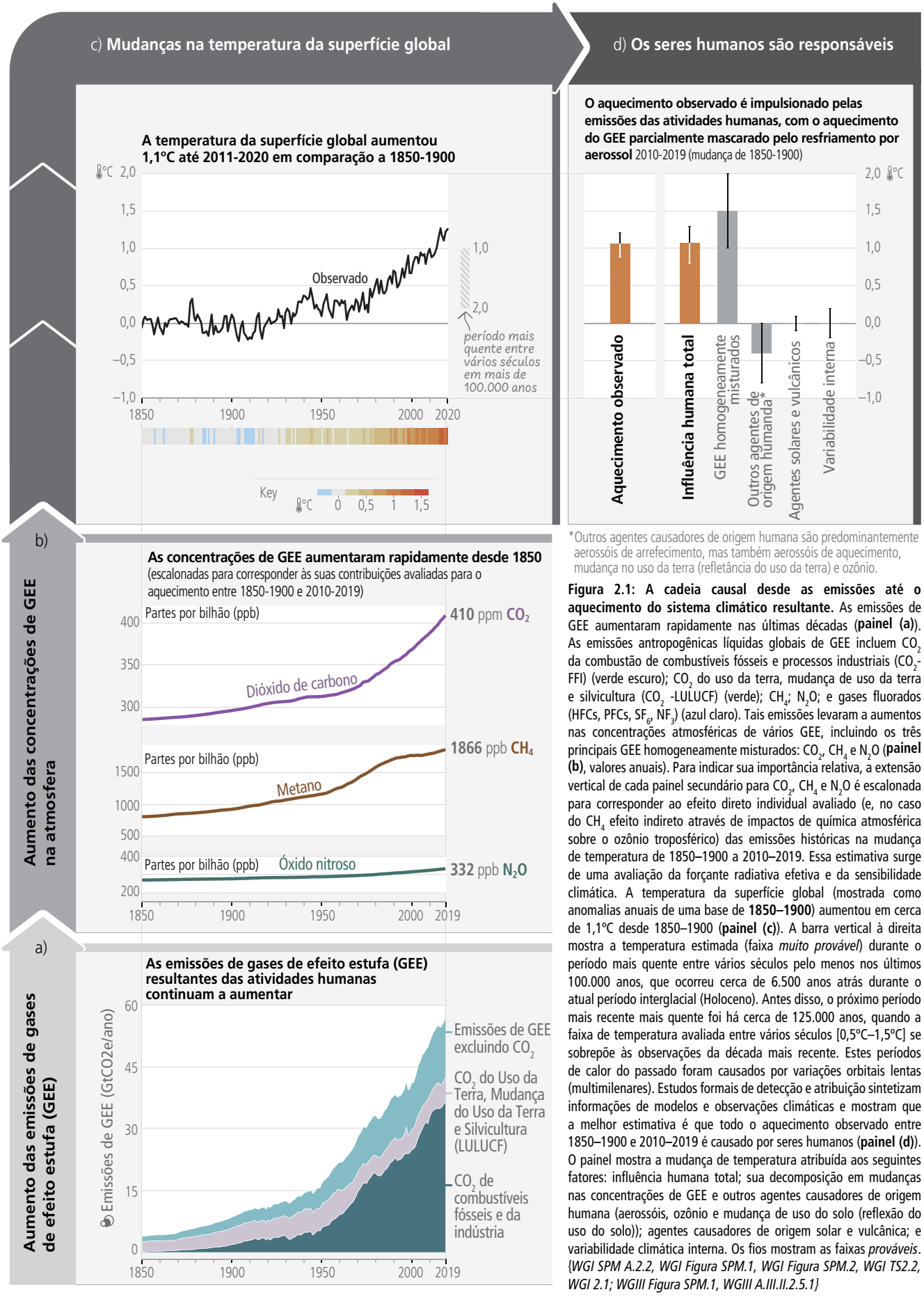
9 A distinção do período com a avaliação observada surge porque os estudos de atribuição consideram este período ligeiramente anterior. O aquecimento observado para 2010–2019 é de 1,06°C [0,88°C–1,21°C]. {WGI SPM nota de rodapé 11}

10 Contribuições de emissões para o aquecimento 2010-2019 relativas a 1850-1900 avaliadas a partir de estudos de forçante radiativa são: CO_2 0,8 [0,5 a 1,2]°C; metano 0,5 [0,3 a 0,8]°C; óxido nitroso 0,1 [0,0 a 0,2]°C e gases fluorados 0,1 [0,0 a 0,2]°C.

11 Para 2021 (o ano mais recente para o qual os números finais estão disponíveis), as concentrações usando os mesmos produtos e métodos de observação que no AR6 WGI são: 415 ppm CO_2; 1896 ppb CH_4; e 335 ppb N_2O. Observe que o CO_2 é relatado aqui usando a escala WMO-CO_2-X2007 para ser consistente com o WGI. O reporte operacional de CO_2 foi atualizado desde então para usar a escala WMO-CO_2-X2019.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 61

As atividades humanas são responsáveis pelo aquecimento global



*Outros agentes causadores de origem humana são predominantemente aerossóis de arrefecimento, mas também aerossóis de aquecimento, mudança no uso da terra (refletância do uso da terra) e ozônio.

Figura 2.1: A cadeia causal desde as emissões até o aquecimento do sistema climático resultante. As emissões de GEE aumentaram rapidamente nas últimas décadas (**painel (a)**). As emissões antropogênicas líquidas globais de GEE incluem CO_2 da combustão de combustíveis fósseis e processos industriais (CO_2-FFI) (verde escuro); CO_2 do uso da terra, mudança de uso da terra e silvicultura (CO_2 -LULUCF) (verde); CH_4; N_2O; e gases fluorados (HFCs, PFCs, SF_6, NF_3) (azul claro). Tais emissões levaram a aumentos nas concentrações atmosféricas de vários GEE, incluindo os três principais GEE homogeneamente misturados: CO_2, CH_4 e N_2O (**painel (b)**, valores anuais). Para indicar sua importância relativa, a extensão vertical de cada painel secundário para CO_2, CH_4 e N_2O é escalonada para corresponder ao efeito direto individual avaliado (e, no caso do CH_4 efeito indireto através de impactos de química atmosférica sobre o ozônio troposférico) das emissões históricas na mudança de temperatura de 1850–1900 a 2010–2019. Essa estimativa surge de uma avaliação da forçante radiativa efetiva e da sensibilidade climática. A temperatura da superfície global (mostrada como anomalias anuais de uma base de **1850–1900**) aumentou em cerca de 1,1°C desde 1850–1900 (**painel (c)**). A barra vertical à direita mostra a temperatura estimada (faixa *muito provável*) durante o período mais quente entre vários séculos pelo menos nos últimos 100.000 anos, que ocorreu cerca de 6.500 anos atrás durante o atual período interglacial (Holoceno). Antes disso, o próximo período mais recente mais quente foi há cerca de 125.000 anos, quando a faixa de temperatura avaliada entre vários séculos [0,5°C–1,5°C] se sobrepõe às observações da década mais recente. Estes períodos de calor do passado foram causados por variações orbitais lentas (multimilenares). Estudos formais de detecção e atribuição sintetizam informações de modelos e observações climáticas e mostram que a melhor estimativa é que todo o aquecimento observado entre 1850–1900 e 2010–2019 é causado por seres humanos (**painel (d)**). O painel mostra a mudança de temperatura atribuída aos seguintes fatores: influência humana total; sua decomposição em mudanças nas concentrações de GEE e outros agentes causadores de origem humana (aerossóis, ozônio e mudança de uso do solo (reflexão do uso do solo)); agentes causadores de origem solar e vulcânica; e variabilidade climática interna. Os fios mostram as faixas *prováveis*. *{WGI SPM A.2.2, WGI Figura SPM.1, WGI Figura SPM.2, WGI TS2.2, WGI 2.1; WGIII Figura SPM.1, WGIII A.III.II.2.5.1}*

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 62

A média anual de emissões de GEE[12] **durante 2010–2019 foi maior do que em qualquer década anterior, mas a taxa de crescimento entre 2010 e 2019 (1,3% ano^{-1}) foi menor do que entre 2000 e 2009 (2,1% ano^{-1}).** As emissões líquidas de CO_2 acumuladas historicamente de 1850 a 2019 foram de 2400 ±240 $GtCO_2$. Delas, mais da metade (58%) ocorreu entre 1850 e 1989 [1400 ±195 $GtCO_2$], e cerca de 42% entre 1990 e 2019 [1000 ±90 $GtCO_2$]. Estima-se que as emissões antropogênicas líquidas globais de GEE foram 59±6,6 $GtCO_2e$ em 2019, cerca de 12% (6,5 $GtCO_2e$) maiores do que em 2010 e 54% (21 $GtCO_2e$) maiores do que em 1990. Em 2019, o maior crescimento das emissões brutas ocorreu no CO_2 dos combustíveis fósseis e da indústria (CO_2-FFI) seguido pelo CH_4, enquanto o maior crescimento relativo ocorreu nos gases fluorados (F-gases), a partir de níveis baixos em 1990. (*alta confiança*) {WGIII SPM B1.1, WGIII SPM B.1.2, WGIII SPM B.1.3, WGIII Figura SPM.1, WGIII Figura SPM.2}

As contribuições regionais às emissões globais de GEE causadas pelo ser humano continuam muito diferentes. As contribuições históricas de emissões de CO_2 variam substancialmente entre regiões em termos de magnitude total, mas também em termos de contribuições de CO_2-FFI (1650 ± 73 $GtCO_2e$) e emissões líquidas de CO_2-LULUCF (760 ± 220 $GtCO_2e$) (Figura 2.2). As variações nas emissões per capita regionais e nacionais refletem, em parte, diferentes estágios de desenvolvimento, mas também variam muito em níveis de renda semelhantes. A média per capita de emissões líquidas antropogênicas de GEE em 2019 variou de 2,6 tCO_2e a 19 tCO_2e entre regiões (Figura 2.2). Os países menos desenvolvidos (LDCs) e os Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (SIDS) têm emissões per capita (1,7 tCO_2e e 4,6 tCO_2e, respectivamente) muito inferiores à média global (6,9 tCO_2e), excluindo CO_2-LULUCF. Cerca de 48% da população mundial em 2019 vive em países que emitem em média mais de 6 tCO_2e per capita, 35% da população mundial vive em países que emitem mais de 9 tCO_2e per capita[13] (excluindo CO_2- LULUCF) enquanto outros 41% vivem em países que emitem menos de 3 tCO_2e per capita. Uma parte substancial da população desses países de baixa emissão não tem acesso aos serviços modernos de energia. (*alta confiança*). {WGIII SPM B.3, WGIII SPM B3.1, WGIII SPM B.3.2, WGIII SPM B.3.3}

As emissões líquidas de GEE aumentaram desde 2010 em todos os principais setores (*alta confiança*). Em 2019, aproximadamente 34% (20 $GtCO_2e$) das emissões globais líquidas de GEE foram provenientes do setor energético, 24% (14 $GtCO_2e$) da indústria, 22% (13 $GtCO_2e$) da AFOLU, 15% (8,7 $GtCO_2e$) do transporte e 6% (3,3 $GtCO_2e$) de edificações[14] (*alta confiança*). O crescimento da média anual de emissões de GEE entre 2010 e 2019 diminuiu em relação à década anterior no fornecimento de energia (de 2,3% para 1,0%) e na indústria (de 3,4% para 1,4%), mas permaneceu praticamente constante em cerca de 2% ano^{-1} no setor de transportes (*alta confiança*). Cerca de metade das emissões líquidas totais de AFOLU é proveniente de CO_2 LULUCF, predominantemente do desmatamento *(confiança média*). A terra em geral constituiu um sumidouro líquido de –6,6 (±4,6) $GtCO_2$ ano^{-1} para o período 2010–2019[15] (*confiança média*). {WGIII SPM B.2, WGIII SPM B.2.1, WGIII SPM B.2.2, WGIII TS 5.6.1}

A mudança do clima causada pelo ser humano é uma consequência de mais de um século de emissões líquidas de GEE do uso da energia, do uso e da mudança no uso da terra, do estilo de vida e dos padrões de consumo e produção. As reduções de emissões de CO_2 de combustíveis fósseis e processos industriais (CO_2-FFI), devido a melhorias na intensidade energética do PIB e na intensidade de carbono da energia, foram menores do que os aumentos de emissões decorrentes do aumento dos níveis de atividade global na indústria, no fornecimento de energia, no transporte, na agricultura e nas edificações. Os 10% de domicílios com as maiores emissões per capita contribuem com 34-45% das emissões globais de GEE domiciliares baseadas no consumo, enquanto os 40% intermediários contribuem com 40-53% e os 50% inferiores contribuem com 13-15%. Uma quota crescente das emissões pode ser atribuída às áreas urbanas (um aumento de cerca de 62% para 67–72% da quota global entre 2015 e 2020). Os agentes causadores das emissões urbanas de GEE[16] são complexos e incluem tamanho da população, renda, estado de urbanização e forma urbana. (*alta confiança*). {WGIII SPM B.2, WGIII SPM B.2.3, WGIII SPM B.3.4, WGIII SPM D.1.1}

[12] As métricas de emissão de GEE são usadas para expressar as emissões de diferentes GEE em uma unidade comum. As emissões agregadas de GEE neste relatório são declaradas em CO_2 equivalente (CO_2e) utilizando o Potencial de Aquecimento Global com um horizonte temporal de 100 anos (GWP100) e valores baseados na contribuição do Grupo de Trabalho I para o AR6. Os relatórios AR6 do WGI e WGIII contêm valores de métrica de emissão atualizados, avaliações de diferentes métricas com relação aos objetivos de mitigação e avaliam novas abordagens para agregar gases. A escolha da métrica depende do objetivo da análise e todas as métricas de emissão de GEE têm limitações e incertezas, já que simplificam a complexidade do sistema climático físico e sua resposta às emissões de GEE passadas e futuras. {WGI SPM D.1.8, WGI 7.6; WGIII SPM B.1, WGIII Caixa de Capítulo Transversal 2.2} (Anexo I: Glossário)

[13] Emissões territoriais

[14] Os níveis de emissão de GEE são arredondados para dois dígitos significativos; como consequência, podem ocorrer pequenas diferenças nas somas devido ao arredondamento {WGIII SPM nota de rodapé 8}

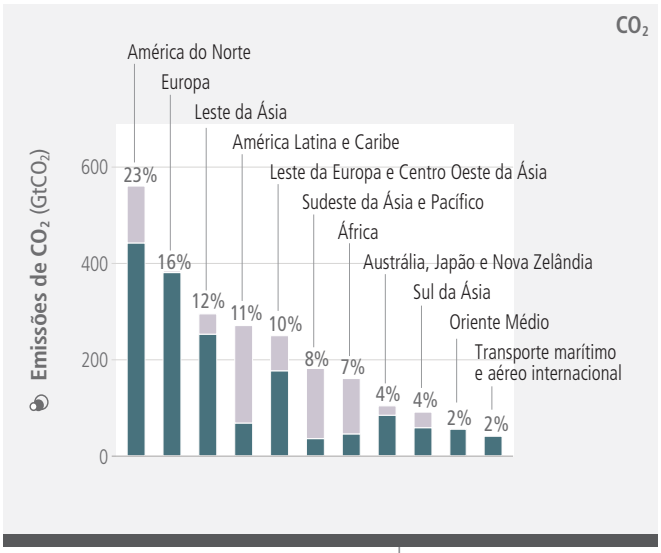
[15] Compreendendo um sumidouro bruto de -12,5 (±3,2) $GtCO_2$ ano^{-1} resultante de respostas de toda a terra tanto a mudanças ambientais antropogênicas quanto à variabilidade climática natural, e emissões líquidas antropogênicas de CO_2 – LULUCF de +5,9 (±4,1) $GtCO_2$ ano^{-1} com base em modelos de contabilidade {WGIII SPM Nota de rodapé 14}.

[16] Esta estimativa é baseada na contabilidade baseada no consumo, incluindo tanto as emissões diretas de dentro das áreas urbanas, quanto as emissões indiretas de fora das áreas urbanas relacionadas com a produção de eletricidade, bens e serviços consumidos nas cidades. Essas estimativas incluem todas as categorias de emissão de CO_2 e CH_4, exceto para combustíveis para aviação e transporte marítimo, mudança de uso do solo, silvicultura e agricultura.
{WGIII SPM nota de rodapé 15}

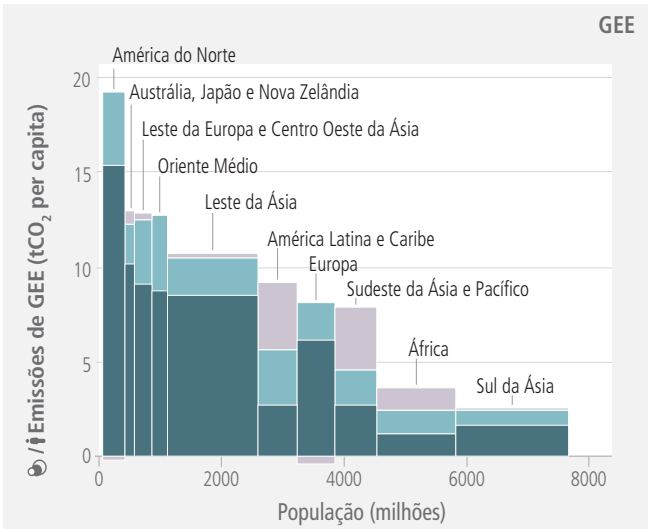
Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 63

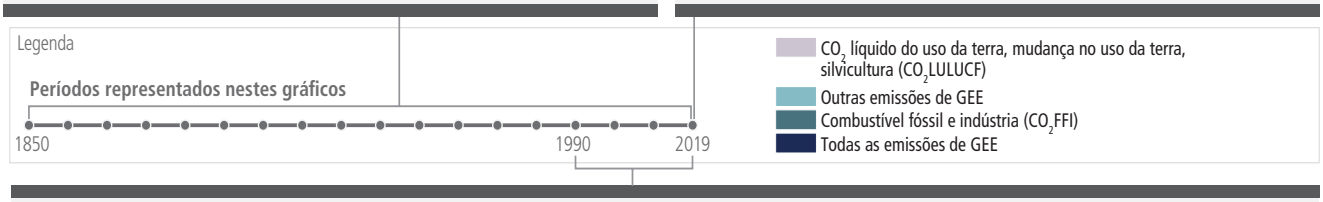
As emissões cresceram na maioria das regiões, mas estão distribuídas de forma desigual, tanto nos dias de hoje quanto cumulativamente desde 1850

a) Emissões antropogênicas líquidas de CO_2 acumuladas historicamente por região (1850-2019)

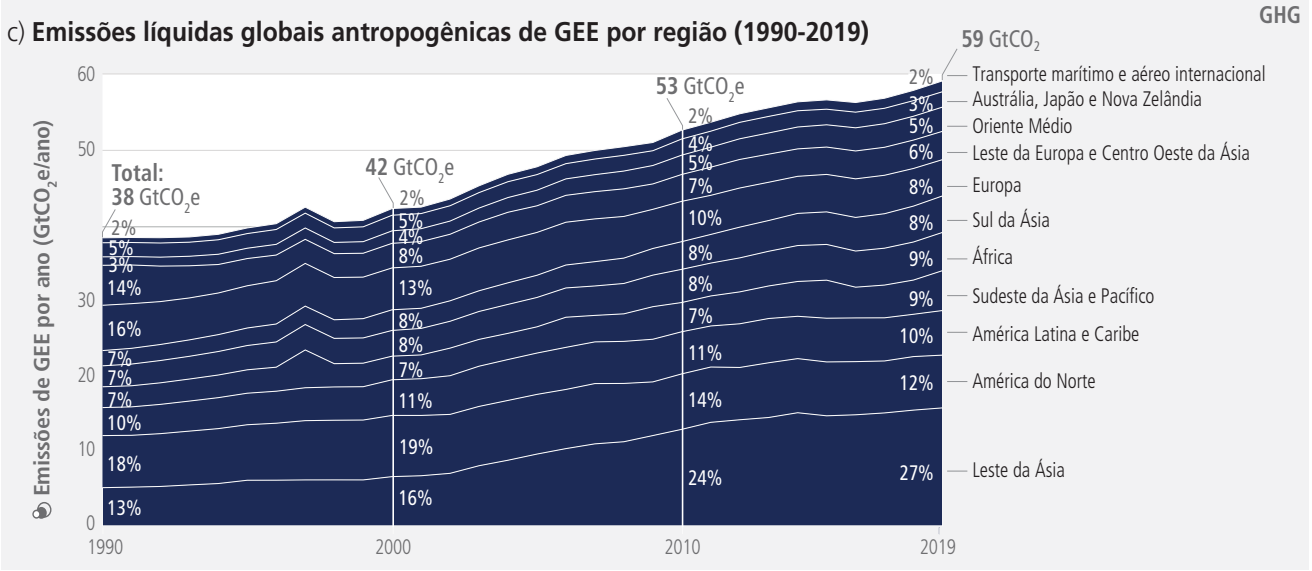


b) Emissões antropogênicas líquidas de GEE per capita e para a população total, por região (2019)





c) Emissões líquidas globais antropogênicas de GEE por região (1990-2019)



d) Indicadores regionais (2019) e contabilidade da produção regional *versus* consumo (2018)

	África	Austrália, Japão, Nova Zelândia	Leste da Ásia	Europa Oriental, Centro-Oeste da Ásia	Europa	América Latina e Caribe	Oriente Médio	América do Norte	Sudeste da Ásia e Pacífico	Sul da Ásia
População (milhões de pessoas, 2019)	1292	157	1471	291	620	646	252	366	674	1836
PIB per capita (US$1000ppp 2017 por pessoa)[1]	5,0	43	17	20	43	15	20	61	12	6,2
GEE líquido 2019[2] (base de produção)										
Intensidade das emissões de GEE (tCO_2e/ $USD1000_{ppp}$ 2017)	0,78	0,30	0,62	0,64	0,18	0,61	0,64	0,31	0,65	0,42
GEE per capita (tCO_2e por pessoa)	3,9	13	11	13	7,8	9,2	13	19	7,9	2,6
CO_2FFI, 2018, por pessoa										
Emissões baseadas na produção (tCO_2-FFI por pessoa, com base em dados de 2018)	1,2	10	8,4	9,2	6,5	2,8	8,7	16	2,6	1,6
Emissões baseadas no consumo (tCO_2-FFI por pessoa, com base em dados de 2018)	0,84	11	6,7	6,2	7,8	2,8	7,6	17	2,5	1,5

[1] PIB per capita em 2019 como base do poder de compra da moeda USD2017
[2] Inclui CO_2FFI, CO_2LULUCF e Outros GEE, excluindo transporte marítimo e aéreo internacional

Os agrupamentos regionais utilizados nesta figura são apenas para fins estatísticos e estão descritos no Anexo II, Parte I do WGIII.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 64

Figura 2.2: Emissões regionais de GEE e a proporção regional do total acumulado de emissões de CO_2 com base na produção de 1850 a 2019. O painel (a) mostra a quota das emissões antropogênicas líquidas de CO_2 acumuladas historicamente por região de 1850 a 2019 em $GtCO_2$. Isso inclui CO_2-FFI e CO_2-LULUCF. Outras emissões de GEE não estão incluídas. As emissões de CO_2-LULUCF estão sujeitas a altas incertezas, refletidas por uma estimativa de incerteza global de ±70% (intervalo de confiança de 90%). O **painel (b)** mostra a distribuição das emissões regionais de GEE em toneladas de CO_2e per capita por região, em 2019. As emissões de GEE são categorizadas em: CO_2-FFI; CO_2-LULUCF líquida; e outras emissões de GEE (CH_4, N_2O, gases fluorados, expressos em CO_2e usando GWP100-AR6). A altura de cada retângulo mostra as emissões per capita, a largura mostra a população da região, de modo que a área dos retângulos se refere ao total de emissões para cada região. As emissões de transporte marítimo e aéreo internacional não estão incluídas. No caso de duas regiões, a área para CO_2-LULUCF está abaixo do eixo, indicando as remoções líquidas de CO_2 e não as emissões. O **painel (c)** mostra as emissões líquidas globais antropogênicas de GEE por região (em $GtCO_2$e ano^{-1} (GWP100–AR6)) para o período de 1990–2019. Os valores percentuais referem-se à contribuição de cada região para o total de emissões de GEE em cada período respectivo. O pico anual de emissões em 1997 foi devido ao aumento das emissões de CO_2-LULUCF de um incêndio florestal e em turfa no Sudeste Asiático. As regiões estão agrupadas no Anexo II do WGIII. O **painel (d)** mostra população, PIB per capita, indicadores de emissão por região em 2019 para o total de GEE por pessoa, e intensidade total de emissões de GEE, juntamente com dados de CO_2-FFI baseados na produção e no consumo, os quais são avaliados neste relatório até 2018. As emissões baseadas no consumo são emissões liberadas para a atmosfera a fim de gerar os bens e serviços consumidos por uma determinada entidade (por exemplo, região). As emissões de transporte marítimo e aéreo internacional não estão incluídas. {WGIII Figura SPM.2}

2.1.2. Mudanças e Impactos do Sistema Climático Observados até o Momento

É inequívoca que a influência humana tem aquecido a atmosfera, o oceano e a terra. Mudanças rápidas e amplamente propagadas na atmosfera, oceano, criosfera e biosfera ocorreram (Tabela 2.1). A escala das mudanças recentes no sistema climático como um todo e o estado atual de muitos aspectos do sistema climático são sem precedentes ao longo de muitos séculos a muitos milhares de anos. É *muito provável* que as emissões de GEE tenham sido o principal fator causador[17] do aquecimento troposférico e é *extremamente provável* que o esgotamento do ozônio estratosférico causado pelo ser humano tenha sido o fator principal do resfriamento estratosférico entre 1979 e meados da década de 1990. É *virtualmente certo* que a camada superior do oceano global (0-700m) está aquecendo desde os anos 70 e é *extremamente provável* que a influência humana seja o fator principal. O aquecimento oceânico foi responsável por 91% do aquecimento do sistema climático, com o aquecimento da terra, a perda de gelo e o aquecimento atmosférico respondendo por cerca de 5%, 3% e 1%, respectivamente (*alta confiança*). O nível médio global do mar aumentou em 0,20 [0,15–0,25] m entre 1901 e 2018. A taxa média de elevação do nível do mar foi de 1,3 [0,6 a 2,1]mm ano^{-1} entre 1901 e 1971, aumentando para 1,9 [0,8 a 2,9] mm ano^{-1} entre 1971 e 2006, e aumentando ainda mais para 3,7 [3,2 a –4,2] mm ano^{-1} entre 2006 e 2018 (*alta confiança*). A influência humana foi *muito provavelmente* o fator principal destes aumentos desde pelo menos 1971 (Figura 3.4). A influência humana é *muito provavelmente* o principal agente causador do recuo global das geleiras desde os anos 90 e da diminuição da área de gelo no Mar Ártico entre 1979–1988 e 2010–2019. A influência humana também contribuiu *muito provavelmente* para diminuir a cobertura de neve na primavera do hemisfério norte e o derretimento superficial da calota de gelo da Groenlândia. É *virtualmente certo* que as emissões de CO_2 causadas pelo ser humano são o fator principal da atual acidificação global da superfície do oceano aberto. {WGI SPM A.1, WGI SPM A.1.3, WGI SPM A.1.5, WGI SPM A.1.6, WG1 SPM A1.7, WGI SPM A.2, WG1.SPM A.4.2; SROCC SPM.A.1, SROCC SPM A.2}

A mudança do clima causada pelo ser humano já está afetando muitos extremos climáticos e meteorológicos em todas as regiões do mundo. As evidências das mudanças observadas em extremos como ondas de calor, precipitações intensas, secas e ciclones tropicais e, em particular, sua atribuição à influência humana, se fortaleceram desde o AR5 (Figura 2.3). É *virtualmente certo* que as temperaturas elevadas extremas (incluindo ondas de calor) se tornaram mais frequentes e mais intensas na maioria das regiões terrestres desde a década de 1950 (Figura 2.3), enquanto as temperaturas baixas extremas (incluindo ondas frias) se tornaram menos frequentes e menos severas, com *alta confiança* de que a mudança do clima causada pelo ser humano é o fator principal dessas mudanças. As ondas de calor marinhas aproximadamente duplicaram em frequência desde os anos 80 *(alta confiança)*, e a influência humana *muito provavelmente* contribuiu para a maioria delas desde pelo menos 2006. A frequência e a intensidade dos eventos de precipitação intensa aumentaram desde a década de 1950 na maioria das áreas terrestres para as quais os dados observacionais são suficientes para a análise de tendências (*alta confiança*), e a mudança do clima causada pelo ser humano é *provavelmente* o principal agente causador (Figura 2.3). A mudança do clima causada pelo ser humano contribuiu para o aumento das secas agrícolas e ecológicas em algumas regiões devido ao aumento da evapotranspiração na terra (*confiança média*) (Figura 2.3). É *provável* que a proporção global de ocorrência de grandes ciclones tropicais (Categoria 3–5) tenha aumentado durante as últimas quatro décadas. {WGI SPM A.3, WGI SPM A3.1, WGI SPM A3.2; WGI SPM A3.4; SRCCL SPM.A.2.2; SROCC SPM. A.2}

A mudança do clima tem causado danos substanciais e, cada vez mais, perdas irreversíveis[18] em ecossistemas terrestres, de água doce, criosféricos e costeiros e de oceano aberto (*alta confiança*). A extensão e a magnitude dos impactos da mudança do clima são maiores do que os estimados em avaliações anteriores (*alta confiança*). Aproximadamente metade das espécies avaliadas globalmente se deslocou para os polos ou, em terra, também para altitudes mais elevadas (*confiança muito alta*). As respostas biológicas, incluindo mudanças na distribuição geográfica e deslocamento de sazonalidade, muitas vezes não são suficientes para lidar com as recentes mudança do clima (*confiança muito alta*). Centenas de perdas locais de espécies foram causadas por aumentos na magnitude das temperaturas elevadas extremas (*alta confiança*) e eventos de mortalidade em massa na terra e no oceano (*confiança muito alta*). Os impactos em alguns ecossistemas estão se aproximando da irreversibilidade, tais como os impactos das mudanças hidrológicas resultantes do recuo das geleiras, ou as mudanças em algumas montanhas (*confiança média*) e ecossistemas árticos impulsionados pelo degelo do permafrost (*alta confiança*). Os impactos nos ecossistemas decorrentes de processos de início lento, como a acidificação dos oceanos, a elevação do nível do mar ou a diminuição regional da precipitação, também foram atribuídos à mudança do clima causada pelo ser humano (*alta confiança*). A mudança do clima contribuiu para a desertificação e a exacerbada degradação da terra,

[17] "Agente causador principal" significa responsável por mais de 50% da mudança {WGI SPM nota de rodapé 12}.

[18] Consulte o Anexo I: Glossário.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 65

particularmente em áreas costeiras de baixa altitude, deltas de rios, terras secas e em áreas de permafrost (*alta confiança*). Cerca de 50% das áreas úmidas costeiras foram perdidas nos últimos 100 anos, como resultado dos efeitos combinados de pressões humanas localizadas, aumento do nível do mar, aquecimento e eventos climáticos extremos (*alta confiança*).{WGII SPM B.1.1, WGII SPM B.1.2, WGII Figura SPM.2.A, WGII TS.B.1; SRCCL SPM A.1.5, SRCCL SPM A.2, SRCCL SPM A.2.6, SRCCL Figura SPM.1; SROCC SPM A.6.1, SROCC SPM, A.6.4, SROCC SPM A.7}

Tabela 2.1: Avaliação das mudanças observadas nos indicadores de grande escala do clima médio através dos componentes do sistema climático, e sua atribuição à influência humana. O código de cores indica a confiança na avaliação / probabilidade[19] da mudança observada e da contribuição humana como agente causador ou agente causador principal (especificado nesse caso), quando disponível (consulte código de cores). Caso contrário, é fornecido um texto explicativo. {WGI Tabela TS.1}

Mudança no indicador		Avaliação das mudanças observadas	Avaliação da contribuição humana
Atmosfera e ciclo da água	Aquecimento da temperatura média global do ar de superfície desde 1850-1900		a faixa *provável* de contribuição humana ([0,8-1,3°C]) abrange a faixa *muito provável* de aquecimento observado ([0,9-1,2°C])
	Aquecimento da troposfera desde 1979		Agente causador principal
	Resfriamento da estratosfera inferior desde meados do século XX		Agente causador de 1979 - meados dos anos 90
	Mudanças na precipitação em grande escala e na umidade da troposfera superior desde 1979		
	Expansão da média zonal da Circulação de Hadley desde a década de 80		Hemisfério Sul
Oceano	O aumento do conteúdo de calor oceânico desde a década de 70		Agente causador principal
	A mudança de salinidade desde meados do século XX		
	Elevação do nível médio global do mar desde a década 70		Agente causador principal
Criosfera	Perda de gelo marinho no Ártico desde 1979		Agente causador principal
	Redução na cobertura de neve durante a primavera do Hemisfério Norte a década de 50		
	Perda de massa de calota de gelo da Groenlândia desde a década de 90		
	Perda de massa de calota de gelo do Ártico desde a década de 90		*Evidência limitada e acordo médio*
	Recuo das geleiras		Agente causador principal
Ciclo do carbono	Aumento da amplitude do ciclo sazonal do CO_2 atmosférico desde o início de 1960		Agente causador principal
	Acidificação da superfície do oceano global		Agente causador principal
Clima da terra	Temperatura média da superfície do ar sobre a terra (cerca de 40% maior que o aquecimento médio global)		Agente causador principal
Síntese	Aquecimento do sistema climático global desde a época pré-industrial		

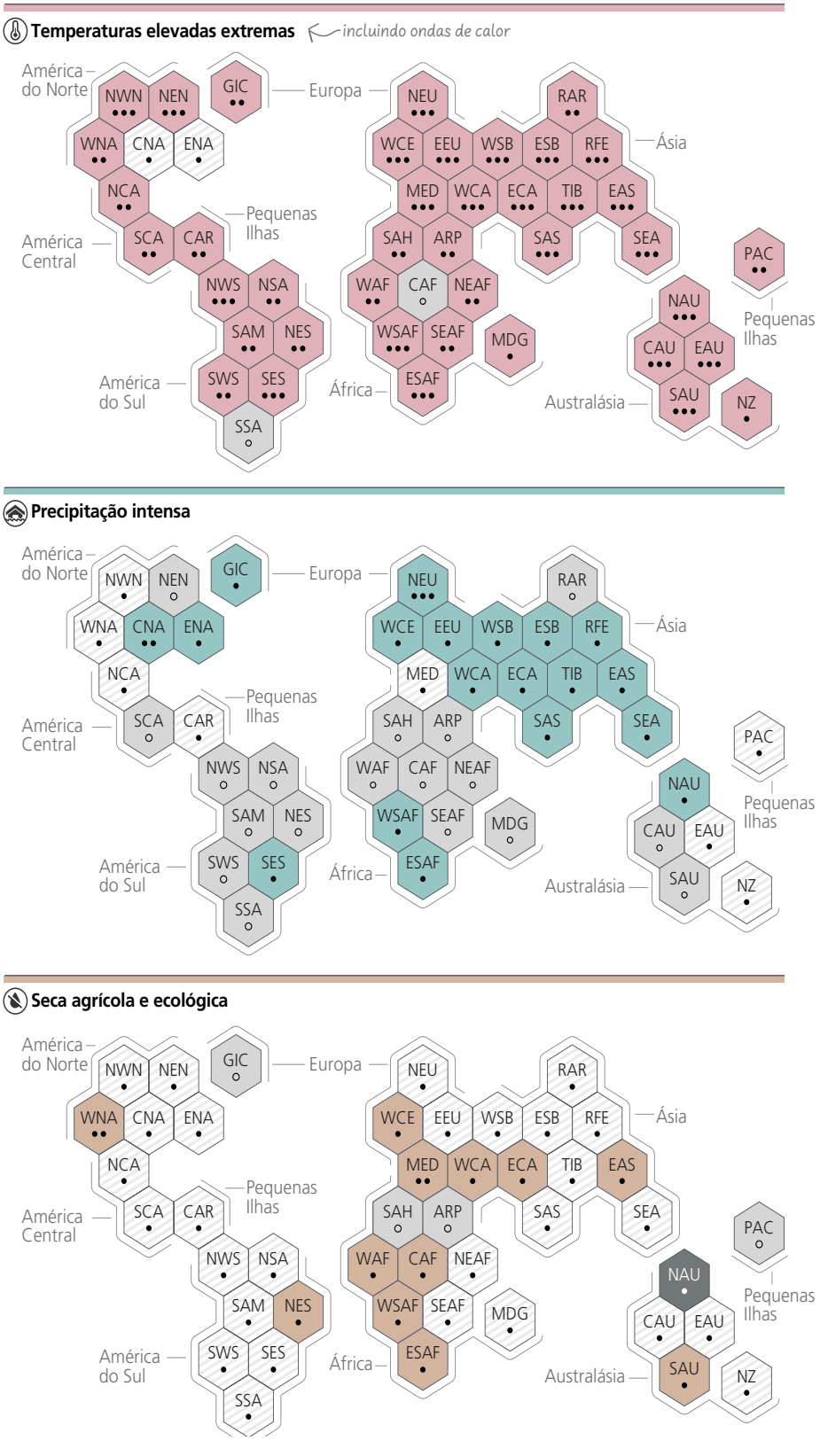
Legenda: *confiança média* | *provável / alta confiança* | *muito provável* | *extremamente provável* | *virtualmente certo* | fato

[19] Com base no entendimento científico, as principais descobertas podem ser formuladas como declarações de fatos ou associadas a um nível de confiança avaliado usando a linguagem calibrada do IPCC.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 66

A mudança do clima impactou os sistemas humanos e naturais em todo o mundo, sendo que, em geral, aqueles que menos contribuíram para a mudança do clima são os mais vulneráveis

a) **Síntese da avaliação da mudança observada em temperaturas elevadas extremas, precipitação intensa e seca, e confiança na contribuição humana para as mudanças observadas nas regiões do mundo**



Dimensão do Risco: **Perigo**

Legenda

Tipo de mudança observada desde a década de 50

- Aumento
- Diminuição
- Literatura e/ou dados limitados
- Baixa concordância quanto ao tipo de mudança

Confiança na contribuição humana para a mudança observada

- ••• Alta
- •• Média
- • Baixa devido a concordância limitada
- ○ Baixa devido a evidências limitadas

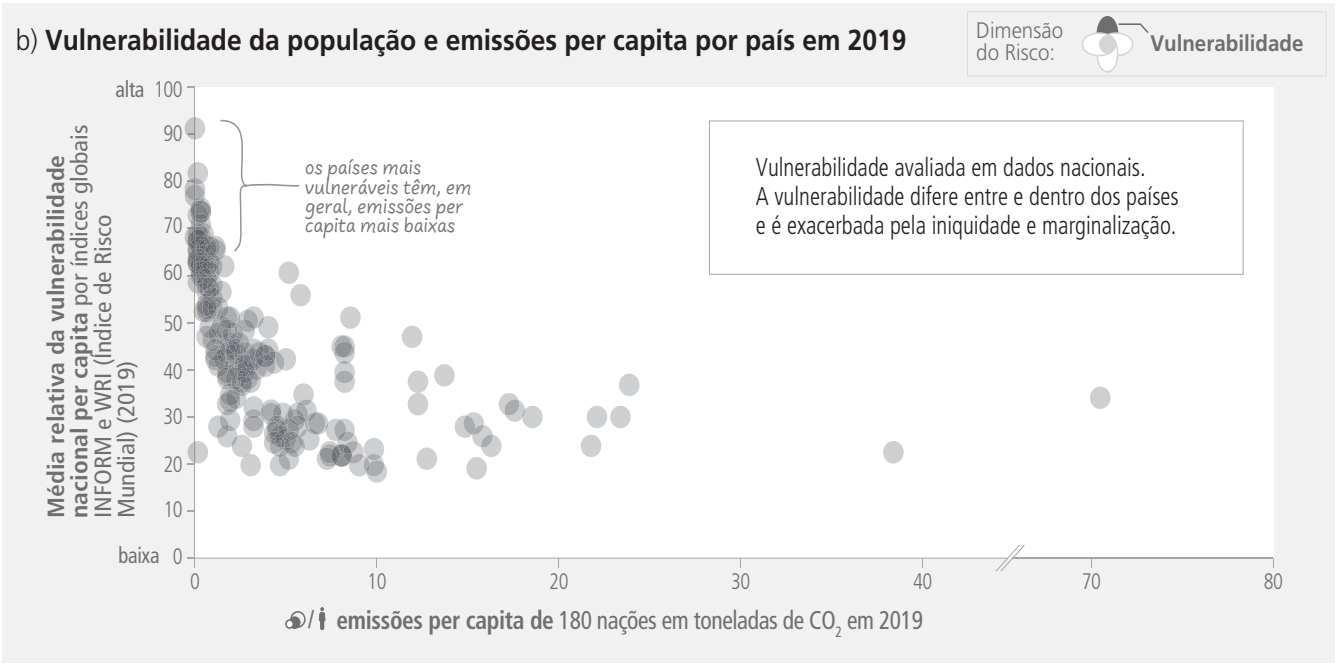
Cada hexágono corresponde a uma região

NWN — Noroeste América do Norte

Regiões de referência do WGI no AR6 do IPCC:

América do Norte: NWN (Noroeste da América do Norte), **NEN** (Nordeste da América do Norte), **WNA** (Oeste da América do Norte), **CNA** (América do Norte Central), **ENA** (Leste da América do Norte), **América Central: NCA** (Norte da América Central), **SCA** (Sul da América Central), **CAR** (Caribe), **América do Sul: NWS** (Noroeste da América do Sul), **NSA** (Norte da América do Sul), **NES** (Nordeste da América do Sul), **SAM** (Monção da América do Sul), **SWS** (Sudoeste da América do Sul), **SES** (Sudeste da América do Sul), **SSA** (Sul da América do Sul), **Europa: GIC** (Groenlândia/Islândia), **NEU** (Norte da Europa), **WCE** (Oeste da Europa e Europa Central), **EEU** (Leste da Europa), **MED** (Mediterrâneo), **África: MED** (Mediterrâneo), **SAH** (Saara), **WAF** (Oeste da África), **CAF** (África Central), **NEAF** (Nordeste da África), **SEAF** (Sudeste da África), **WSAF** (Oeste do Sul da África), **ESAF** (Leste do Sul da África), **MDG** (Madagascar), **Ásia: RAR** (Ártico Russo), **WSB** (Oeste da Sibéria), **ESB** (Leste da Sibéria), **RFE** (Extremo Leste Russo), **WCA** (Oeste da Ásia Central), **ECA** (Leste da Ásia Central), **TIB** (Planalto Tibetano), **EAS** (Leste da Ásia), **ARP** (Península Arábica), **SAS** (Sul da Ásia), **SEA** (Sudeste da Ásia), **Australásia: NAU** (Norte da Austrália), **CAU** (Austrália Central), **EAU** (Leste da Austrália), **SAU** (Sul da Austrália), **NZ** (Nova Zelândia), **Ilhas Pequenas: CAR** (Caribe), **PAC** (Pequenas Ilhas do Pacífico)

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 67



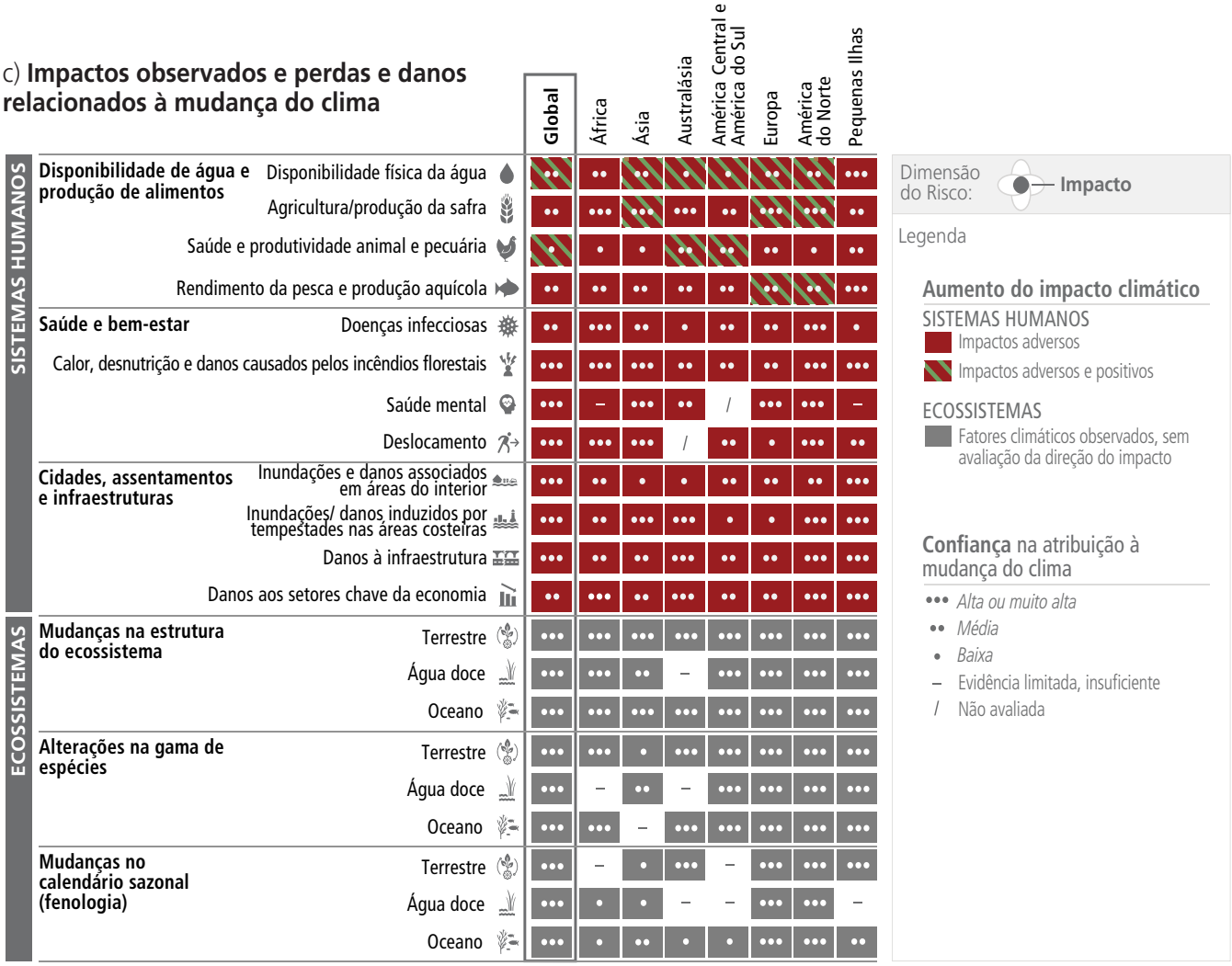


Figura 2.3: Tanto a vulnerabilidade aos extremos climáticos atuais quanto a contribuição histórica para a mudança do clima são altamente heterogêneas, sendo que muitos dos que menos contribuíram para a mudança do clima até o momento são os mais vulneráveis a seus impactos. Painel (a) O WGI no AR6 do IPCC exibe as regiões habitadas como hexágonos com tamanho idêntico em sua localização geográfica aproximada (consulte a legenda para obter as siglas regionais). Todas as avaliações são feitas para cada região como um todo e para a década de 50 até o presente. Avaliações feitas em diferentes escalas de tempo ou mais escalas espaciais locais podem diferir do que é mostrado na figura. As cores em cada painel representam os quatro resultados da avaliação sobre as mudanças observadas. Os hexágonos listrados (branco e cinza-claro) são usados quando há *baixa concordância* quanto ao tipo de mudança para a região como um todo, e os hexágonos cinza são usados quando há dados e/ou literatura limitados que impedem uma avaliação da região como um todo. Outras cores indicam pelo menos uma *confiança média* na mudança observada. O nível de confiança para a influência humana sobre essas mudanças observadas baseia-se na avaliação da literatura de detecção e atribuição de tendências e atribuição de

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 68

eventos, sendo indicado pelo número de pontos: três pontos para *alta confiança*, dois pontos para *confiança média* e um ponto para *confiança baixa* (ponto único, preenchido: *acordo limitado*; ponto único, vazio: *evidência limitada*). Em relação a temperaturas elevadas extremas, a evidência é extraída principalmente das mudanças nas métricas baseadas nas temperaturas máximas diárias; além disso, são usados estudos regionais que utilizam outros índices (duração, frequência e intensidade das ondas de calor). Para precipitação intensa, a evidência é extraída principalmente de mudanças nos índices baseados em quantidades de precipitação de um dia ou cinco dias utilizando estudos globais e regionais. As secas agrícolas e ecológicas são avaliadas com base nas mudanças observadas e simuladas na umidade total de coluna de solo, complementadas por evidências sobre mudanças na umidade superficial do solo, balanço hídrico (precipitação menos evapotranspiração) e agentes causadores impulsionados pela precipitação e demanda evaporativa atmosférica. **O Painel (b)** mostra o nível médio de vulnerabilidade entre a população de um país em relação às emissões de CO_2-FFI per capita de 2019 por país para os 180 países para os quais ambos os conjuntos de métricas estão disponíveis. As informações sobre vulnerabilidade são baseadas em dois sistemas de indicadores globais, a saber INFORM e Índice de Risco Mundial. Os países com uma vulnerabilidade média relativamente baixa muitas vezes têm grupos com alta vulnerabilidade dentro de sua população e vice-versa. Os dados subjacentes incluem, por exemplo, informações sobre pobreza, desigualdade, infraestrutura de assistência médica ou cobertura de seguro. **Painel (c)** Impactos observados nos ecossistemas e sistemas humanos atribuídos à mudança do clima em escala global e regional. As avaliações globais se concentram em grandes estudos, multiespécies, meta-análises e grandes revisões. As avaliações regionais consideram evidências sobre impactos em toda uma região e não se concentram em nenhum país em particular. Para sistemas humanos, a direção dos impactos é avaliada e tanto impactos adversos quanto positivos foram observados, por exemplo, impactos adversos em uma área ou item alimentar podem ocorrer com impactos positivos em outra área ou item alimentar (para mais detalhes e metodologia, consulte WGII SMTS.1). A disponibilidade física de água inclui o equilíbrio da água disponível de várias fontes, incluindo água subterrânea, qualidade de água e demanda de água. As avaliações globais de saúde mental e de deslocamento refletem apenas as regiões avaliadas. Os níveis de confiança refletem a avaliação da atribuição do impacto observado à mudança do clima. {WGI Figura SPM.3, Tabela TS.5, Atlas Interativo; WGII Figura SPM.2, WGII SMTS.1, WGII 8.3.1, Figura 8.5; WGIII 2.2.3}

A mudança do clima reduziu a segurança alimentar e afetou a segurança hídrica devido ao aquecimento, à mudança nos padrões de precipitação, à redução e à perda de elementos criosféricos e à maior frequência e intensidade de extremos climáticos, dificultando, assim, os esforços para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (*alta confiança*). Embora a produtividade agrícola geral tenha aumentado, a mudança do clima desacelerou esse crescimento da produtividade agrícola nos últimos 50 anos em todo o mundo *(confiança média*), com impactos negativos relacionados ao rendimento da safra registrados principalmente em regiões de latitude média e baixa, e alguns impactos positivos em algumas regiões de latitude alta (*alta confiança*). O aquecimento dos oceanos no século XX e nos anos seguintes contribuiu para uma diminuição geral do potencial máximo de captura *(confiança média*), agravando os impactos da pesca excessiva em alguns estoques de peixes (*confiança alta*). O aquecimento e a acidificação dos oceanos afetaram negativamente a produção de alimentos da aquicultura e da pesca de crustáceos e moluscos em algumas regiões oceânicas (*alta confiança*). Os níveis atuais de aquecimento global estão associados a riscos moderados de aumento da escassez de água em terras secas (*alta confiança*). Atualmente, cerca de metade da população mundial enfrenta grave escassez de água em pelo menos uma parte do ano devido a uma combinação de fatores climáticos e não climáticos (*confiança média*) (Figura 2.3). A expansão agrícola insustentável, impulsionada em parte por dietas desequilibradas[20], aumenta a vulnerabilidade do ecossistema e humana e leva à competição por terras e/ou recursos hídricos (*alta confiança*). Os eventos climáticos e extremos cada vez mais intensos expuseram milhões de pessoas à insegurança alimentar aguda[21] e reduziram a segurança hídrica, com os maiores impactos observados em muitos locais e/ou comunidades na África, Ásia, América Central e do Sul, LDCs, Pequenas Ilhas e no Ártico, e para os pequenos produtores de alimentos, domicílios de baixa renda e Povos Indígenas em todo o mundo *(alta confiança*). {WGII SPM B.1.3, WGII SPM.B.2.3, WGII Figura SPM.2, WGII TS B.2.3, WGII TS Figura TS. 6; SRCCL SPM A.2.8, SRCCL SPM A.5.3; SROCC SPM A.5.4, SROCC SPM A.7.1, SROCC SPM A.8.1, SROCC Figura SPM.2}

Em ambientes urbanos, a mudança do clima tem causado impactos adversos sobre a saúde humana, a subsistência e a infraestrutura essencial (*alta confiança*). Temperaturas elevadas extremas, incluindo as ondas de calor, se intensificaram nas cidades *(alta confiança)*, onde também pioraram os eventos de poluição do ar *(confiança média*) e o funcionamento limitado da infraestrutura essencial (*alta confiança*). A infraestrutura urbana, incluindo sistemas de transporte, água, saneamento e energia foram comprometidos por eventos extremos e de início lento[22], com perdas econômicas resultantes, interrupções nos serviços e impactos ao bem-estar *(alta confiança)*. Os impactos observados estão concentrados entre os residentes urbanos marginalizados econômica e socialmente, por exemplo, aqueles que vivem em assentamentos informais *(alta confiança)*. As cidades intensificam o aquecimento causado pelo ser humano localmente (*confiança muito alta*), enquanto a urbanização também aumenta a precipitação média e intensa sobre e/ou a favor do vento das cidades (*confiança média*) e a intensidade do escoamento superficial resultante (*alta confiança*). {WGI SPM C.2.6; WGII SPM B.1.5, WGII Figura TS.9, WGII 6 ES}

A mudança do clima afetou negativamente a saúde física humana a nível global e a saúde mental em regiões avaliadas (*confiança muito alta*), e está contribuindo para crises humanitárias onde as ameaças climáticas interagem com a alta vulnerabilidade (*alta confiança*). Em todas as regiões, o aumento dos eventos de calor extremo resultou em mortalidade e morbidade humana (*confiança muito alta*). A ocorrência de doenças de origem alimentar e hídrica relacionadas ao clima aumentou (*confiança muito alta*). A incidência de doenças transmitidas por vetores aumentou a partir da expansão da gama e/ou aumento da reprodução dos vetores de doenças (*alta confiança*). Doenças animais e humanas, incluindo zoonoses, estão surgindo em novas áreas (*alta confiança*). Em regiões avaliadas, alguns problemas de saúde mental estão associados ao aumento da temperatura (*alta confiança*), traumas de eventos extremos

[20] As dietas balanceadas incluem alimentos de origem vegetal, como aquelas baseadas em cereais secundários, legumes, frutas e verduras, castanhas e sementes, e alimentos de origem animal produzidos em sistemas resilientes, sustentáveis e com baixas emissões de GEE, conforme descrito no SRCCL. {WGII SPM Nota de rodapé 32}

[21] A insegurança alimentar aguda pode ocorrer a qualquer momento com uma gravidade que ameaça vidas, meios de subsistência ou ambos, independentemente das causas, contexto ou duração, como resultado de choques que arriscam determinantes da segurança alimentar e nutrição, sendo usada para avaliar a necessidade de ação humanitária {WGII SPM, nota de rodapé 30}.

[22] Os eventos lentos são descritos entre os fatores de impacto climático do AR6 do WGI e referem-se aos riscos e impactos associados, por exemplo, ao aumento dos meios de temperatura, desertificação, diminuição da precipitação, perda de biodiversidade, degradação da terra e da floresta, recuo glacial e impactos relacionados, acidificação dos oceanos, elevação do nível do mar e salinização {WGII SPM, nota de rodapé 29}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 69

(*confiança muito alta*) e perda de meios de subsistência e cultura (*alta confiança*) (Figura 2.3). Os impactos da mudança do clima na saúde são mediados por sistemas naturais e humanos, incluindo condições econômicas e sociais e crises (*alta confiança*). Os extremos climáticos e meteorológicos estão cada vez mais provocando deslocamentos na África, Ásia, América do Norte (*alta confiança*), América Central e do Sul (*confiança média*) (Figura 2.3), com pequenos estados insulares no Caribe e Pacífico Sul afetados desproporcionalmente em relação ao tamanho de sua pequena população (*alta confiança*). Através do deslocamento e da migração involuntária de eventos climáticos e meteorológicos extremos, a mudança do clima gerou e perpetuou a vulnerabilidade (*confiança média*). {WGII SPM B.1.4, WGII SPM B.1.7}

A influência humana *provavelmente* aumentou a chance de eventos extremos compostos[23] desde a década de 50. Ameaças climáticas simultâneas e repetidas ocorreram em todas as regiões, aumentando os impactos e riscos para a saúde, ecossistemas, infraestrutura, meios de subsistência e alimentos (*alta confiança*). Os eventos extremos compostos incluem aumentos na frequência de ondas de calor e secas simultâneas (*alta confiança*); temporada de incêndio em algumas regiões (*confiança média*); e enchentes compostas em alguns locais (*confiança média*). Riscos múltiplos interagem, gerando novas fontes de vulnerabilidade às ameaças climáticas e agravando o risco geral *(alta confiança*). Ameaças climáticas compostas podem sobrecarregar a capacidade de adaptação e aumentar substancialmente os danos *(alta confiança)*. {WGI SPM A.3.5; WGII SPM. B.5.1, WGII TS.C.11.3}

Os impactos econômicos atribuíveis à mudança do clima estão afetando cada vez mais a subsistência das pessoas e estão causando impactos econômicos e sociais além das fronteiras nacionais *(alta confiança)*. Danos econômicos da mudança do clima foram detectados em setores expostos ao clima, com efeitos regionais na agricultura, silvicultura, pesca, energia e turismo, e por meio da produtividade do trabalho ao ar livre (*alta confiança*) com algumas exceções de impactos positivos em regiões com baixa demanda energética e vantagens comparativas nos mercados agrícolas e turismo (*alta confiança*). Os meios de subsistência individuais foram afetados por mudanças na produtividade agrícola, impactos na saúde humana e na segurança alimentar, destruição de casas e infraestrutura e perda de propriedade e renda, com efeitos adversos sobre a igualdade de gênero e social (*alta confiança*). Os ciclones tropicais têm reduzido o crescimento econômico a curto prazo *(alta confiança*). Estudos de atribuição de eventos e compreensão física indicam que a mudança do clima causada pelo ser humano aumenta a precipitação intensa associada a ciclones tropicais (*alta confiança*). Os incêndios florestais em muitas regiões afetaram os ativos construídos, a atividade econômica e a saúde (confiança *média* a *alta*). Nas cidades e assentamentos, os impactos climáticos na infraestrutura essencial estão levando a perdas e danos através dos sistemas de água e alimentos, e afetam a atividade econômica, com impactos que vão além da área diretamente impactada pela ameaça climática *(alta confiança*). {WGI SPM A.3.4, WGII SPM B.1.6, WGII SPM B.5.2, WGII SPM B.5.3}

A mudança do clima tem causado impactos adversos difundidos e perdas e danos relacionados à natureza e às pessoas (*alta confiança*). As perdas e danos estão desigualmente distribuídos entre sistemas, regiões e setores (*alta confiança*). As perdas culturais, relacionadas ao patrimônio tangível e intangível, ameaçam a capacidade de adaptação e podem resultar em perdas irreversíveis de sentido de pertencimento, práticas culturais valorizadas, identidade e lar, particularmente para os Povos Indígenas e aqueles mais diretamente dependentes do meio ambiente para sua subsistência *(confiança média*). Por exemplo, as mudanças na cobertura de neve, no gelo dos lagos e rios e no permafrost em muitas regiões árticas estão prejudicando a subsistência e a identidade cultural dos habitantes do Ártico, incluindo as populações indígenas *(alta confiança*). A infraestrutura, incluindo sistemas de transporte, água, saneamento e energia foram comprometidos por eventos extremos e de início lento, com perdas econômicas resultantes, rupturas nos serviços e impactos ao bem-estar (*alta confiança*). {WGII SPM B.1; WGII SPM B.1.2, WGII SPM.B.1.5, WGII SPM C.3.5, WGII TS.B.1.6; SROCC SPM A.7.1}

Em diferentes setores e regiões, as pessoas e sistemas mais vulneráveis foram desproporcionalmente afetados pelos impactos da mudança do clima (*alta confiança*). Os LDCs e SIDS que têm emissões per capita muito menores (1,7 tCO_2e, 4,6 tCO_2e, respectivamente) do que a média global (6,9 tCO_2e), excluindo CO_2-LULUCF, também apresentam alta vulnerabilidade às ameaças climáticas, com pontos críticos globais de alta vulnerabilidade humana observados nas regiões Oeste, Central e Leste da África, Sul da Ásia, América Central e do Sul, SIDS e o Ártico (*alta confiança*). Regiões e pessoas com limitações de desenvolvimento consideráveis têm alta vulnerabilidade a ameaças climáticas (*alta confiança*). A vulnerabilidade é maior em locais com pobreza, desafios de governança e acesso limitado a serviços e recursos básicos, conflitos violentos e altos níveis de sensibilidade ao clima nos modos de subsistência (por exemplo, pequenos agricultores e pecuaristas, comunidades pesqueiras) (*alta confiança*). A vulnerabilidade em diferentes níveis espaciais é exacerbada pela inequidade e marginalização ligadas ao gênero, etnia, baixa renda ou combinações destas *(alta confiança*), especialmente para muitos Povos Indígenas e comunidades locais *(alta confiança*). Aproximadamente 3,3 a 3,6 bilhões de pessoas vivem em contextos altamente vulneráveis à mudança do clima *(alta confiança*). Entre 2010 e 2020, a mortalidade humana causada por enchentes, secas e tempestades foi 15 vezes maior em regiões altamente vulneráveis, em comparação com regiões com vulnerabilidade muito baixa *(alta confiança*). No Ártico e em algumas regiões de alta montanha, os impactos negativos da mudança da criosfera têm sido especialmente sentidos entre os Povos Indígenas (*alta confiança*). A vulnerabilidade humana e dos ecossistemas são interdependentes (*alta confiança*). A vulnerabilidade dos ecossistemas e das pessoas à mudança do clima difere substancialmente entre e dentro das regiões (*confiança muito alta*), impulsionada por padrões de desenvolvimento socioeconômico interconectados, uso insustentável do oceano e da terra, inequidade, marginalização, padrões históricos e contínuos de inequidade como o colonialismo, e governança[24] (*alta confiança*). {WGII SPM B.1, WGII SPM B.2, WGII SPM B.2.4; WGIII SPM B.3.1; SROCC SPM A.7.1, SROCC SPM A.7.2}

[23] Consulte o Anexo I: Glossário.

[24] Governança: As estruturas, ações e processos através dos quais os atores privados e públicos interagem para atingir os objetivos da sociedade. Isso inclui instituições formais e informais e as normas, regras, leis e procedimentos associados para decidir, gerenciar, implementar e monitorar políticas e medidas em qualquer escala geográfica ou política, de global a local. {WGII SPM Nota de rodapé 31}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 70

2.2 Respostas até o Momento

Os acordos climáticos internacionais, as crescentes ambições nacionais para a ação climática, juntamente com a crescente conscientização do público, estão acelerando os esforços para enfrentar a mudança do clima em múltiplos níveis de governança. As políticas de mitigação têm contribuído para uma diminuição da intensidade global de energia e de carbono, com vários países alcançando reduções de emissões de GEE por mais de uma década. As tecnologias de baixa emissão estão se tornando mais acessíveis, com muitas opções de baixa ou zero emissão disponíveis atualmente para energia, edificações, transporte e indústria. O progresso no planejamento e implementação da adaptação geraram múltiplos benefícios, com opções de adaptação eficazes com potencial para reduzir os riscos climáticos e contribuir para o desenvolvimento sustentável. O financiamento global rastreado para mitigação e adaptação tem visto uma tendência ascendente desde o AR5, mas fica aquém das necessidades. *(alta confiança)*

2.2.1. Definição de Políticas Globais

A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), o Protocolo de Quioto e o Acordo de Paris estão apoiando o aumento dos níveis de ambição nacional e incentivando o desenvolvimento e a implementação de políticas climáticas em vários níveis de governança *(alta confiança)*. O Protocolo de Quioto levou à redução de emissões em alguns países e foi fundamental para a construção de capacidade nacional e internacional para reporte, contabilidade e mercados de emissões de GEE (*alta confiança*). O Acordo de Paris, adotado no âmbito da UNFCCC, com participação quase universal, levou ao desenvolvimento de políticas e à definição de metas em níveis nacionais e subnacionais, principalmente em relação à mitigação, mas também à adaptação, bem como ao aumento da transparência das ações e do apoio climáticos (*confiança média*). As Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), demandadas pelo Acordo de Paris, exigiram que os países articulassem suas prioridades e ambições com relação à ação climática. {WGII 17.4, WGIII SPM B.5.1, WGIII SPM E.6, WGII TS D.1.1}

O tema de Perdas e Danos[25] foi formalmente reconhecido em 2013 através da criação do *Mecanismo Internacional de Varsóvia sobre Perdas e Danos* (WIM), e em 2015, o Artigo 8 do Acordo de Paris forneceu uma base legal para o WIM. Há um melhor entendimento sobre perdas e danos, tanto econômicos quanto não econômicos, que informa a política climática internacional e destaca que as perdas e danos não são tratados de forma abrangente pelos atuais arranjos financeiros, de governança e institucionais, particularmente em países vulneráveis em desenvolvimento (*alta confiança*). {WGII SPM C.3.5, Caixa de Capítulo Transversal PERDAS}

Outros acordos globais recentes que influenciam as respostas à mudança do clima incluem o Marco de Ação de Sendai para Redução de Risco de Desastres (2015–2030), a Agenda de Ação de Adis Abeba voltada para o financiamento (2015) e a Nova Agenda Urbana (2016), a Emenda de Kigali ao Protocolo de Montreal sobre Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio (2016), entre outros. Além disso, a Agenda para o Desenvolvimento Sustentável de 2030, adotada em 2015 pelos Estados-membros da ONU, estabelece 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e visa alinhar esforços globalmente para dar prioridade ao fim da pobreza extrema, proteger o planeta e promover sociedades mais pacíficas, prósperas e inclusivas. Se alcançados, estes acordos reduziriam a mudança do clima e os impactos na saúde, bem-estar, migração e conflito, entre outros *(confiança muito alta)*. {WGII TS.A.1, WGII 7 ES}

Desde o AR5, a crescente conscientização do público e uma diversidade crescente de atores têm ajudado a acelerar o compromisso político e os esforços globais para enfrentar a mudança do clima (*confiança média*). Movimentos sociais de massa têm surgido como agentes catalisadores em algumas regiões, muitas vezes com base em movimentos anteriores incluindo movimentos liderados pelos Povos Indígenas, movimentos de juventude, movimentos de direitos humanos, ativismo de gênero e litígio climático, o que está aumentando a conscientização e, em alguns casos, tem influenciado o resultado e a ambição da governança climática *(confiança média)*. O engajamento dos Povos Indígenas e das comunidades locais usando abordagens de transição justa e de tomada de decisões baseadas em direitos, implementadas por meio de processos de tomada de decisões coletivas e participativas, possibilitou uma ambição mais profunda e acelerou a ação de diferentes maneiras e em todas as escalas, dependendo das circunstâncias nacionais (*confiança média*). A mídia ajuda a moldar o discurso público sobre a mudança do clima. Isso pode servir para construir um apoio público para acelerar a ação climática *(evidência média, alto acordo)*. Em alguns casos, os discursos públicos da mídia e os movimentos de oposição organizados têm impedido a ação climática, exacerbando o desamparo e a desinformação e alimentando a polarização, com implicações negativas para a ação climática *(confiança média)*. {WGII SPM C.5.1, WGII SPM D.2, WGII TS.D.9, WGII TS.D.9.7, WGII TS.E.2.1, WGII 18.4; WGIII SPM D.3.3, WGIII SPM E.3.3, WGIII TS.6.1, WGIII 6.7, WGIII 13 ES, WGIII Caixa .13.7}

2.2.2. Ações de Mitigação até o Momento

Tem havido uma expansão consistente das políticas e leis que tratam da mitigação desde o AR5 (*alta confiança*). A governança climática apoia a mitigação, fornecendo estruturas através das quais diversos atores interagem e uma base para o desenvolvimento e implementação de políticas *(confiança média)*. Muitos instrumentos regulatórios e econômicos já foram implantados com sucesso *(alta confiança)*. Em 2020, as leis focaram principalmente na redução das emissões de GEE em 56 países cobrindo 53% das emissões globais *(confiança média)*. A aplicação de diversos instrumentos políticos para mitigação ao nível nacional e subnacional tem crescido consistentemente em uma gama de setores (*alta confiança*). A cobertura da política é desigual entre setores e permanece limitada para emissões provenientes da agricultura, e de materiais e matérias-primas industriais *(alta confiança)*. {WGIII SPM B.5, WGIII SPM B.5.2, WGIII SPM E.3, WGIII SPM E.4}

Experiências práticas informam projetos de instrumento econômico e ajudam a melhorar a previsibilidade, a eficácia ambiental, a eficiência econômica, o alinhamento com as metas distributivas e a aceitação social (*alta confiança*). A inovação tecnológica de baixa emissão é fortalecida através da combinação de políticas de impulso tecnológico, juntamente com políticas que criam incentivos para mudança de comportamento e oportunidades de mercado *(alta confiança)* (Seção 4.8.3). Pacotes de políticas abrangentes e consistentes foram considerados mais eficazes do que políticas únicas (*alta confiança*). Combinando a mitigação com políticas para reorientar as trajetórias de desenvolvimento, políticas

[25] Consulte o Anexo I: Glossário.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 71

que induzem mudanças de estilo de vida ou de comportamento, por exemplo, medidas que promovem zonas urbanas pedonais combinadas com eletrificação e energia renovável podem criar cobenefícios para a saúde a partir de ar mais limpo e maior mobilidade ativa (*alta confiança*). A governança climática possibilita a mitigação fornecendo uma direção-geral, definindo metas, integrando a ação climática em todos os domínios e níveis de políticas, com base nas circunstâncias nacionais e no contexto da cooperação internacional. A governança efetiva aumenta a segurança regulatória, criando organizações especializadas e o contexto para mobilizar o financiamento *(confiança média)*. Tais funções podem ser impulsionadas por leis relevantes ao clima, que estão crescendo em número, ou estratégias climáticas, entre outras, com base no contexto nacional e subnacional (*confiança média*). A governança climática efetiva e equitativa se baseia no envolvimento de atores da sociedade civil, atores políticos, empresas, jovens, trabalhadores, mídia, Povos Indígenas e comunidades locais (*confiança média*). {WGIII SPM E.2.2, WGIII SPM E.3, WGIII SPM E.3.1, WGIII SPM E.4.2, WGIII SPM E.4.3, WGIII SPM E.4.4}

Os custos unitários de várias tecnologias de baixa emissão, incluindo energia solar, eólica e baterias de íon-lítio, têm caído consistentemente desde 2010 (Figura 2.4). As inovações em design e processos, combinadas com o uso de tecnologias digitais, levaram à disponibilidade quase comercial de muitas opções de emissões baixas ou zero em edifícios, nos transportes e na indústria. De 2010 a 2019, houve reduções sustentadas nos custos unitários de energia solar (em 85%), energia eólica (em 55%) e baterias de íons-lítio (em 85%), e grandes aumentos em sua implantação, por exemplo, >10× para energia solar e >100× para veículos elétricos (EVs), embora variando amplamente entre as regiões (Figura 2.4). A eletricidade proveniente da energia fotovoltaica e eólica é agora mais barata que a eletricidade de fontes fósseis em muitas regiões, os veículos elétricos são cada vez mais competitivos com os motores de combustão interna e o armazenamento de baterias em larga escala nas redes elétricas é cada vez mais viável. Em comparação com as tecnologias modulares de pequeno porte, o registro empírico mostra que múltiplas tecnologias de mitigação em larga escala, com menos oportunidades de aprendizagem, têm observado reduções mínimas de custos e sua adoção tem crescido lentamente. A manutenção de sistemas com emissões intensivas pode, em algumas regiões e setores, ser mais cara do que a transição para sistemas de baixas emissões. (*alta confiança*) {WGIII SPM B.4, WGIII SPM B.4.1, WGIII SPM C.4.2, WGIII SPM C.5.2, WGIII SPM C.7.2, WGIII SPM C.8, WGIII Figura SPM.3, WGIII Figura SPM.3}

Para quase todos os materiais básicos – metais primários, materiais de construção e produtos químicos – muitos processos de produção de baixa a zero intensidade de GEE estão em fase piloto a quase comercial e, em alguns casos, comercial, mas ainda não são uma prática industrial estabelecida. O projeto integrado na construção e retroajuste de edifícios levou a exemplos crescentes de edifícios de energia zero ou de carbono zero. A inovação tecnológica possibilitou a adoção generalizada da iluminação LED. As tecnologias digitais, incluindo sensores, a Internet das coisas, robótica e inteligência artificial podem melhorar o gerenciamento de energia em todos os setores; podem aumentar a eficiência energética e promover a adoção de muitas tecnologias de baixa emissão, incluindo a energia renovável descentralizada, ao mesmo tempo em que criam oportunidades econômicas. Entretanto, alguns desses ganhos de mitigação da mudança do clima podem ser reduzidos ou contrabalançados pelo crescimento da demanda por bens e serviços devido ao uso de dispositivos digitais. Várias opções de mitigação, em especial energia solar, energia eólica, eletrificação de sistemas urbanos, infraestrutura verde urbana, eficiência energética, gerenciamento pelo lado da demanda, melhor gerenciamento de florestas, culturas agrícolas e redução do desperdício e da perda de alimentos, são tecnicamente viáveis, estão se tornando cada vez mais econômicas e, em geral, contam com o apoio do público, permitindo a expansão da implantação em muitas regiões. (*alta confiança*) {WGIII SPM B.4.3, WGIII SPM C.5.2, WGIII SPM C.7.2, WGIII SPM E.1.1, WGIII TS.6.5}

A magnitude dos fluxos globais de financiamento climático aumentou e os canais de financiamento se ampliaram (*alta confiança*). Os fluxos financeiros totais anuais rastreados para mitigação e adaptação climática aumentaram em até 60% entre 2013/14 e 2019/20, mas o crescimento médio diminuiu desde 2018 (*confiança média*) e a maioria das finanças climáticas permanece nas fronteiras nacionais (*alta confiança*). Os mercados de títulos verdes, produtos financeiros sustentáveis ambientais, sociais e de governança expandiram-se significativamente desde o AR5 (*alta confiança*). Os investidores, bancos centrais e reguladores financeiros estão promovendo uma maior consciência do risco climático para apoiar o desenvolvimento e a implementação de políticas climáticas (*alta confiança*). A cooperação financeira internacional acelerada é um facilitador essencial para transições justas e com baixo teor de GEE (*alta confiança*). {WGIII SPM B.5.4, WGIII SPM E.5, WGIII TS.6.3, WGIII TS.6.4}

Os instrumentos econômicos têm sido eficazes na redução de emissões, complementados por instrumentos regulatórios principalmente ao nível nacional e também subnacional e regional (*alta confiança*). Em 2020, mais de 20% das emissões globais de GEE foram cobertas por impostos sobre o carbono ou sistemas de comércio de emissões, embora a cobertura e os preços tenham sido insuficientes para alcançar reduções profundas (*confiança média*). Os impactos equitativos e distributivos dos instrumentos de fixação de preços de carbono podem ser abordados utilizando a receita dos impostos sobre o carbono ou do comércio de emissões para apoiar os domicílios de baixa renda, entre outras abordagens (*alta confiança*). A combinação de instrumentos de política que reduziu os custos e estimulou a adoção da energia solar, da energia eólica e das baterias de íon-lítio inclui P&D públicos, financiamento para demonstração e projetos-piloto e instrumentos pela procura, como subsídios de implantação para atingir escala (*alta confiança*) (Figura 2.4). {WGIII SPM B.4.1, WGIII SPM B.5.2, WGIII SPM E.4.2, WG III TS.3}

As **ações de mitigação, apoiadas por políticas, contribuíram para uma diminuição da intensidade de energia e carbono global entre 2010 e 2019, com um número crescente de países alcançando reduções absolutas de emissões de GEE por mais de uma década (*alta confiança*).** Embora as emissões líquidas globais de GEE tenham aumentado desde 2010, a intensidade de energia global (energia primária total por unidade do PIB) diminuiu 2% ano^{-1} entre 2010 e 2019. A intensidade global de carbono (CO_2–FFI por unidade de energia primária) também diminuiu em 0,3% ano^{-1}, principalmente devido à mudança de combustível do carvão para o gás, à expansão reduzida da capacidade do carvão e ao aumento do uso de energias renováveis, e com grandes variações regionais durante o mesmo período. Em muitos países, as políticas têm aumentado a eficiência energética, reduzido as taxas de desmatamento e acelerado a implantação da tecnologia, levando a evitar e, em alguns casos, reduzir ou remover as emissões (*alta confiança*). Pelo menos 18 países têm mantido reduções absolutas de emissões de CO_2 e GEE com base na produção e de CO_2 com base no consumo por mais de 10 anos desde 2005 por meio da descarbonização do fornecimento de energia, ganhos de eficiência energética e redução da demanda energética, que resultaram tanto de políticas quanto de mudanças na estrutura econômica (*alta confiança*). Alguns países reduziram as emissões de GEE baseadas na produção em um terço ou mais desde o pico, e alguns alcançaram taxas de redução de cerca de 4% ano^{-1} por vários anos consecutivos (*alta confiança*). Várias linhas de evidência sugerem que as políticas de mitigação levaram a evitar emissões globais de várias $GtCO_2$–eq ano^{-1} (*confiança média*).

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 72

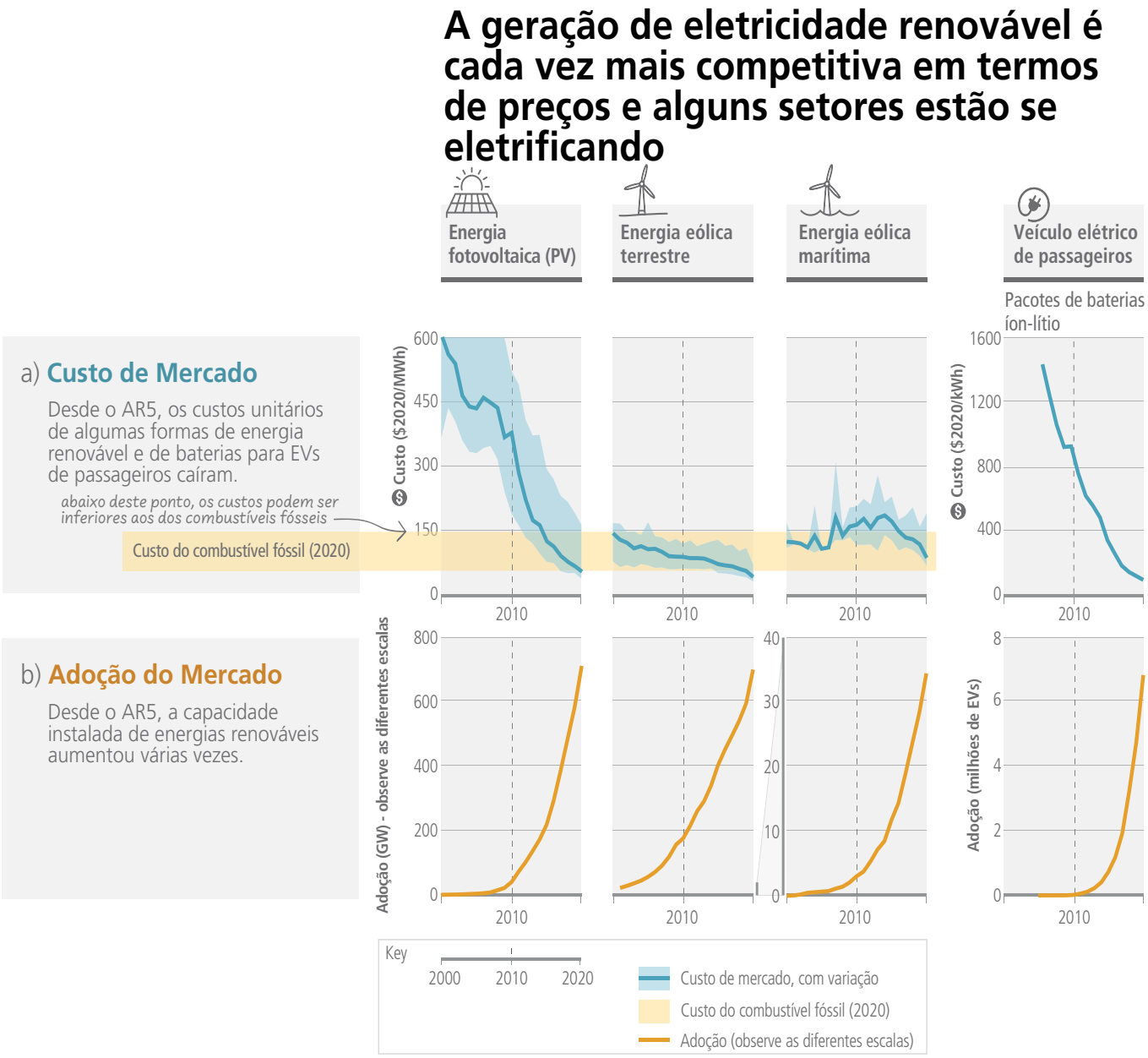


Figura 2.4: **Reduções de custo unitário e uso em algumas tecnologias de mitigação que mudam rapidamente.** O **painel superior (a)** mostra os custos globais por unidade de energia (USD por MWh) para algumas tecnologias de mitigação em rápida mudança. As linhas azuis sólidas indicam o custo unitário médio em cada ano. As áreas sombreadas de azul-claro mostram o intervalo entre o 5º e o 95º percentil em cada ano. O sombreamento amarelo indica a faixa de custos unitários para novas energias fósseis (carvão e gás) em 2020 (correspondente a USD55–148 por MWh). Em 2020, os custos nivelados de eletricidade (LCOE) das três tecnologias de energia renovável poderiam competir com os combustíveis fósseis em muitos lugares. Para as baterias, os custos mostrados são para 1 kWh de capacidade de armazenamento de bateria; para os outros, os custos são do tipo LCOE, que inclui custos de instalação, capital, operações e manutenção por MWh de eletricidade produzida. A literatura utiliza o LCOE porque permite comparações consistentes das tendências de custo por meio de um conjunto diversificado de tecnologias energéticas. No entanto, não inclui os custos de integração em rede ou impactos climáticos. Além disso, o LCOE não considera outras externalidades ambientais e sociais que podem modificar os custos gerais (monetários e não monetários) das tecnologias e alterar sua implantação. O **painel inferior (b)** mostra a adoção global acumulada para cada tecnologia, em GW de capacidade instalada para energia renovável e em milhões de veículos para veículos elétricos a bateria. Uma linha tracejada vertical é colocada em 2010 para indicar a mudança ao longo da última década. A quota de produção de eletricidade reflete diferentes fatores de capacidade; por exemplo, para a mesma quantidade de capacidade instalada, a energia eólica produz cerca de duas vezes mais eletricidade do que a energia solar fotovoltaica {WGIII 2.5, 6.4}. As tecnologias de energia renovável e de baterias foram selecionadas como exemplos ilustrativos porque apresentaram recentemente mudanças rápidas nos custos e na adoção, e porque há dados consistentes disponíveis. Outras opções de mitigação avaliadas no relatório do WGIII não estão incluídas, pois não atendem a estes critérios. {WGIII Figura SPM.3, WGIII 2.5, 6.4}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 73

Pelo menos 1,8 $GtCO_2$–eq ano^{-1} de emissões evitadas podem ser contabilizadas agregando estimativas separadas para os efeitos dos instrumentos econômicos e regulatórios (*confiança média*). Um número crescente de leis e ordens executivas tem impactado as emissões globais e estima-se que tenham resultado em 5,9 $GtCO_2$–eq ano^{-1} de emissões evitadas em 2016 (*confiança média*). Essas reduções compensaram apenas parcialmente o crescimento das emissões globais (*alta confiança*) {WGIII SPM B.1, WGIII SPM B.2.4, WGIII SPM B.3.5, WGIII SPM B.5.1, WGIII SPM B.5.3, WGIII 1.3.2, WGIII 2.2.3}.

2.2.3. Ações de Adaptação até o Momento

Progresso no planejamento e implementação da adaptação foi observado em todos os setores e regiões, gerando múltiplos benefícios (*confiança muito alta*). A ambição, o escopo e o progresso na adaptação aumentaram entre os governos nos níveis local, nacional e internacional, com as empresas, as comunidades e a sociedade civil *(alta confiança*). Várias ferramentas, medidas e processos estão disponíveis e podem habilitar, acelerar e sustentar a implementação da adaptação *(alta confiança*). A crescente conscientização pública e política dos impactos e riscos climáticos fez com que pelo menos 170 países e muitas cidades incluíssem a adaptação em suas políticas climáticas e processos de planejamento (*alta confiança*). Ferramentas de apoio à decisão e serviços climáticos estão sendo cada vez mais utilizadas (*confiança muito alta*) e projetos-piloto e experimentos locais estão sendo implementados em diferentes setores (*alta confiança*). {WGII SPM C.1, WGII SPM.C.1.1, WGII TS.D.1.3, WGII TS.D.10}

A adaptação aos riscos e impactos relacionados à água constituem a maioria (~60%) de todas as adaptações documentadas[26] (*alta confiança*). Um grande número destas respostas de adaptação está no setor agrícola e estas incluem o gerenciamento da água na fazenda, além de armazenamento de água, conservação da umidade do solo e irrigação. Outras adaptações na agricultura incluem melhorias de cultivares, sistemas agroflorestais, adaptação baseada na comunidade e diversificação agrícola e paisagística, entre outras (*alta confiança*). No caso de enchentes em regiões interiores, combinações de medidas não estruturais, como sistemas de alerta antecipado, aumento da retenção natural de água, como a restauração de áreas úmidas e rios, e planejamento do uso da terra, como zonas onde a construção é proibida ou gerenciamento de florestas a montante, podem reduzir o risco de enchentes (*confiança média*). Algumas ações de adaptação relacionadas à terra, tais como produção sustentável de alimentos, manejo florestal melhorado e sustentável, manejo de carbono orgânico do solo, conservação de ecossistemas e restauração da paisagem, redução do desmatamento e degradação, e redução da perda e desperdício de alimentos estão sendo realizadas, e podem ter cobenefícios de mitigação (*alta confiança*). As ações de adaptação que aumentam a resiliência da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos à mudança do clima incluem respostas como a minimização de pressões ou distúrbios adicionais, redução da fragmentação, aumento da extensão do habitat natural, conectividade e heterogeneidade, e proteção de refúgios em pequena escala onde as condições microclimáticas podem permitir a persistência de espécies (*alta confiança*). A maioria das inovações em adaptação urbana ocorreu por meio de avanços na gestão de risco de desastre, redes de segurança social e infraestrutura verde/azul (*confiança média*). Muitas medidas de adaptação que beneficiam a saúde e o bem-estar são encontradas em outros setores (por exemplo, alimentação, meios de subsistência, proteção social, água e saneamento, infraestrutura) (*alta confiança*). {WGII SPM C.2.1, WGII SPM C.2.2, WGII TS.D.1.2, WGII TS.D.1.4, WGII TS.D.4.2, WGII TS.D.8.3, WGII TS.D.4 ES; SRCCL SPM B.1.1}

A adaptação pode gerar múltiplos benefícios adicionais, como a melhoria da produtividade agrícola, inovação, saúde e bem-estar, segurança alimentar, subsistência e conservação da biodiversidade, bem como a redução de riscos e danos (*confiança muito alta*). {WGII SPM C1.1}

O financiamento global rastreado da adaptação tem mostrado uma tendência crescente desde o AR5, mas representa apenas uma pequena parcela do financiamento total do clima, é desigual e se desenvolveu de forma heterogênea entre regiões e setores (*alta confiança*). O financiamento da adaptação tem vindo predominantemente de fontes públicas, em grande parte através de doações, instrumentos concessionais e não concessionais *(confiança muito alta*). Globalmente, o financiamento privado de adaptação de diversas fontes, tais como instituições financeiras comerciais, investidores institucionais, outras participações privadas, corporações não financeiras, assim como comunidades e domicílios, tem sido limitado, especialmente em países em desenvolvimento (*alta confiança*). Os mecanismos públicos e financeiros podem alavancar o financiamento do setor privado para a adaptação, abordando barreiras reais e percebidas de regulamentação, custo e mercado, por exemplo, através de parcerias público-privadas *(alta confiança*). Inovações no financiamento de adaptação e resiliência, tais como sistemas de financiamento baseados em previsões/antecipativos e pools de seguros de risco regionais, foram testadas e estão crescendo em escala (*alta confiança*). {WGII SPM C.3.2, WGII SPM C.5.4; WGII TS.D.1.6, WGII Caixa de Capítulo Transversal FINANCE; WGIII SPM E.5.4}

Existem opções de adaptação que são eficazes[27] na redução dos riscos climáticos[28] para contextos, setores e regiões específicos e contribuem positivamente para o desenvolvimento sustentável e outras metas societais. No setor agrícola, melhorias de cultivares, gestão e armazenamento de água na fazenda, conservação da umidade do solo, irrigação[29], sistemas agroflorestais, adaptação baseada na comunidade e diversificação ao nível de fazenda e paisagem, assim como abordagens de gestão sustentável na terra/no solo, proporcionam múltiplos benefícios e reduzem os riscos climáticos. A redução da perda e do desperdício de alimentos e as medidas de adaptação em apoio a

[26] A adaptação documentada refere-se à literatura publicada sobre políticas, medidas e ações de adaptação, que foram implementadas e documentadas na literatura revisada por pares, em oposição à adaptação que pode ter sido planejada, mas não implementada.

[27] Eficácia refere-se aqui à medida em que uma opção de adaptação é antecipada ou observada para a redução do risco relacionado ao clima.

[28] Consulte o Anexo I: Glossário.

[29] A irrigação é efetiva na redução do risco de seca e dos impactos climáticos em muitas regiões e traz vários benefícios para a subsistência, mas precisa de um gerenciamento adequado para evitar possíveis resultados adversos, que podem incluir o esgotamento acelerado das águas subterrâneas e de outros recursos hídricos e aumento da salinização do solo *(confiança média)*.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 74

dietas equilibradas contribuem para os benefícios da nutrição, saúde e biodiversidade. (*alta confiança*) {WGII SPM C.2, WGII SPM C.2.1, WGII SPM C.2.2; SRCCL B.2, SRCCL SPM C.2.1}

Abordagens de adaptação baseada em ecossistemas[30] como ecologia urbana, restauração de áreas úmidas e ecossistemas florestais a montante reduzem uma série de riscos da mudança do clima, incluindo riscos de enchente, calor urbano e proporcionam múltiplos cobenefícios. Algumas opções de adaptação baseadas na terra/no solo proporcionam benefícios imediatos (por exemplo, conservação de turfeiras, áreas úmidas, serras, manguezais e florestas); enquanto o florestamento e o reflorestamento, a restauração de ecossistemas de alto carbono, o agroflorestamento e a recuperação de solos degradados levam mais tempo para produzir resultados mensuráveis. Existem sinergias significativas entre adaptação e mitigação, por exemplo, através de abordagens de manejo sustentável da terra. Práticas e princípios agroecológicos e outras abordagens que trabalham com processos naturais apoiam a segurança alimentar, a nutrição, a saúde e o bem-estar, os meios de subsistência e a biodiversidade, a sustentabilidade e os serviços de ecossistemas. (*alta confiança*) {WGII SPM C.2.1, WGII SPM C.2.2, WGII SPM C.2.5, WGII TS.D.4.1; SRCCL SPM B.1.2, SRCCL SPM.B.6.1; SROCC SPM C.2}

Combinações de medidas não estruturais como sistemas de alerta precoce e medidas estruturais como diques reduziram a perda de vidas em caso de enchentes em regiões interiores (*confiança média*) e os sistemas de alerta precoce juntamente com a edificações resistentes a enchentes provaram ser custo-efetivos no contexto de inundações costeiras sob a atual elevação do nível do mar (*alta confiança*). Planos de Ação para Saúde para o Calor que incluem sistemas de alerta precoce e resposta são opções de adaptação eficazes para calor extremo (*alta confiança*). Opções eficazes de adaptação para água, alimentos e doenças transmitidas por vetores incluem a melhoria do acesso à água potável, a redução da exposição dos sistemas de água e saneamento para eventos climáticos extremos, e a melhoria dos sistemas de alerta precoce, vigilância e desenvolvimento de vacinas *(confiança muito alta*). Opções de adaptação, tais como gerenciamento de risco de desastre, sistemas de alerta precoce, serviços climáticos e redes de segurança social têm ampla aplicabilidade em múltiplos setores (*alta confiança*). {WGII SPM C.2.1, WGII SPM C.2.5, WGII SPM C.2.9, WGII SPM C.2.11, WGII SPM C.2.13; SROCC SPM C.3.2}

Soluções integradas e multissetoriais que abordam as inequidades sociais, diferenciam as respostas com base no risco climático e são transversais aos sistemas, aumentam a viabilidade e a eficácia da adaptação em múltiplos setores (*alta confiança*). {WGII SPM C.2}

2.3 Ações e Políticas Atuais de Mitigação e Adaptação não são Suficientes

No momento da presente avaliação[31] existem diferenças entre as ambições globais e a soma das ambições nacionais declaradas. Elas são ainda agravadas por diferenças entre as ambições nacionais declaradas e a implementação atual para todos os aspectos da ação climática. Para mitigação, as emissões globais de GEE em 2030 decorrentes das NDCs anunciadas até outubro de 2021 tornariam *provável* que o aquecimento excedesse 1,5°C durante o século 21 e mais difícil limitar o aquecimento abaixo de 2°C.[32] Apesar do progresso, lacunas de adaptação[33] persistem, com muitas iniciativas priorizando a redução de risco a curto prazo, dificultando a adaptação transformacional. Limites rígidos e flexíveis de adaptação estão sendo atingidos em alguns setores e regiões, enquanto a má adaptação também está aumentando e afetando de forma desproporcional os grupos vulneráveis. Barreiras sistêmicas, tais como lacunas de financiamento, conhecimento e práticas, incluindo a falta de instrução climática e de dados, dificultam o progresso da adaptação. O financiamento insuficiente, especialmente para a adaptação, limita a ação climática em particular nos países em desenvolvimento. (alta confiança)

[30] A EbA (Adaptação Baseada em Ecossistemas) é reconhecida internacionalmente sob a Convenção sobre Diversidade Biológica (CBD14/5). Um conceito relacionado é o de Soluções Baseadas na Natureza (NbS), consulte o Anexo I: Glossário

[31] O cronograma de vários cortes para avaliação difere pelo relatório do WG e pelo aspecto avaliado. Consulte a nota de rodapé 1 na Seção 1.

[32] Consulte CSB.2 para uma discussão de cenários e trajetórias.

[33] Consulte o Anexo I: Glossário.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 75

2.3.1. A Lacuna entre Políticas de Mitigação, Compromissos e Trajetórias que Limitam o Aquecimento a 1,5 ou Abaixo de 2ºC

As emissões globais de GEE em 2030 associadas à implementação das NDCs anunciadas antes da COP26[34] tornariam *provável* que o aquecimento excedesse 1,5ºC durante o século XXI e mais difícil limitar o aquecimento abaixo de 2ºC - se não forem assumidos compromissos ou tomadas medidas adicionais (Figura 2.5, Tabela 2.2).

Existe uma "diferença de emissões" substancial, pois as emissões globais de GEE em 2030 associadas à implementação das NDCs anunciadas antes da COP26 seriam semelhantes ou apenas ligeiramente inferiores aos níveis de emissão de 2019 e superiores aos associados às trajetórias de mitigação modeladas que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) com ou sem *overshoot* limitado ("sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada") ou até 2ºC(>67%), assumindo uma ação imediata, implicando em reduções de emissões globais de GEE profundas, rápidas e sustentadas nesta década (*alta confiança*) (Tabela 2.2, Tabela 3.1, 4.1).[35] A magnitude da diferença de emissões depende do nível de aquecimento global considerado e se apenas os elementos incondicionais ou também condicionais das NDCs[36] são considerados (*alta confiança*) (Tabela 2.2). Trajetórias modeladas que são consistentes com as NDCs anunciadas antes da COP26 até 2030 e assumem que nenhum aumento de ambição depois disso têm emissões mais elevadas, levando a um aquecimento global médio de 2,8 [2,1–3,4]ºC até 2100 (*confiança média*). Se a "diferença de emissões" não for reduzida, as emissões globais de GEE em 2030, consistentes com as NDCs anunciadas antes da COP26, tornam *provável* que o aquecimento exceda 1,5ºC durante o século XXI, enquanto limitar o aquecimento a 2ºC (>67%) implicaria uma aceleração sem precedentes dos esforços de mitigação durante 2030–2050 (*confiança média*) (consulte a Seção 4.1, CSB2). {WGIII SPM B.6, WGIII SPM B.6.1, WGIII SPM B.6.3, WGIII SPM B.6.4, WGIII SPM C.1.1}.

As políticas implementadas até o final de 2020 deverão resultar em emissões globais de GEE mais elevadas em 2030 do que aquelas implícitas pelas NDCs, indicando uma "diferença de implementação"[37] (*alta confiança*) (Tabela 2.2, Figura 2.5). As emissões globais previstas implicadas pelas políticas implementadas até o final de 2020 são de 57 (**52–60**) $GtCO_2$–eq em 2030 (Tabela 2.2). Isso aponta para uma diferença de implementação em comparação com as NDCs de 4–7 $GtCO_2$–eq em 2030 (Tabela 2.2); sem um fortalecimento das políticas, projeta-se um aumento das emissões, levando a um aquecimento global mediano de 2,2ºC–3,5ºC (faixa *muito provável*) até 2100 (*confiança média*) (consulte a Seção 3.1.1). {WGIII SPM B.6.1, WGIII SPM C.1}

As emissões futuras acumuladas de CO_2 projetadas ao longo da vida útil da infraestrutura existente de combustíveis fósseis sem redução adicional[38] excedem o total acumulado de emissões líquidas de CO_2 nas trajetórias que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%), com ou sem *overshoot* limitado ("sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada"). São aproximadamente iguais ao total acumulado de emissões líquidas de CO_2 nas trajetórias que limitam o aquecimento a 2ºC com uma probabilidade de 83%[39] (consulte a Figura 3.5). Limitar o aquecimento a 2ºC (>67%) ou menos resultará em ativos estagnados. Cerca de 80% do carvão, 50% do gás e 30% das reservas de petróleo não podem ser queimados e emitidos se o aquecimento for limitado a 2ºC. Espera-se que um número significativamente maior de reservas não seja queimado se o aquecimento for limitado a 1,5ºC. *(alta confiança)* {WGIII SPM B.7, WGIII Caixa. 6.13}

---

34 As NDCs anunciadas antes da COP26 referem-se às NDCs mais recentes enviadas à UNFCCC até a data de corte da literatura do relatório do WGIII, 11 de outubro de 2021, e às NDCs revisadas anunciadas pela China, Japão e República da Coreia antes de outubro de 2021, mas somente enviadas depois. 25 Atualizações da NDC foram apresentadas entre 12 de outubro de 2021 e o início da COP26. {WGIII SPM nota de rodapé 24}

35 A ação imediata nas trajetórias globais modeladas refere-se à adoção, entre 2020 e, no máximo, antes de 2025, de políticas climáticas destinadas a limitar o aquecimento global a um determinado nível. As trajetórias modeladas que limitam o aquecimento a 2ºC (>67%) com base na ação imediata estão resumidas na categoria C3a na Tabela 3.1. Todas as trajetórias globais modeladas avaliadas que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) com ou sem overshoot limitado ("sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada") assumem ação imediata conforme definido aqui (Categoria C1 na Tabela 3.1). {WGIII SPM nota de rodapé 26}

36 Neste relatório, elementos "incondicionais" das NDCs referem-se aos esforços de mitigação apresentados sem quaisquer condições. Os elementos "condicionais" referem-se aos esforços de mitigação que são contingentes à cooperação internacional, por exemplo, acordos bilaterais e multilaterais, financiamento ou transferências monetárias e/ou tecnológicas. Essa terminologia é usada na literatura e nos Relatórios Síntese de NDC da UNFCCC, não no Acordo de Paris. {WGIII SPM nota de rodapé 27}

37 As diferenças na implementação referem-se ao quanto as políticas e ações atualmente promulgadas estão longe de alcançar os compromissos. A data de corte de políticas em estudos usados para projetar emissões de GEE de "políticas implementadas até o final de 2020" varia entre julho de 2019 e novembro de 2020. {WGIII Tabela 4.2, WGIII SPM nota de rodapé 25}

38 A redução aqui se refere a intervenções humanas que reduzem a quantidade de GEE que são liberados da infraestrutura de combustíveis fósseis para a atmosfera. {WGIII SPM nota de rodapé 34}

39 O WGI fornece orçamentos de carbono que estão conforme a limitação do aquecimento global aos limites de temperatura com diferentes possibilidades, tais como 50%, 67% ou 83% {WGI Tabela SPM.2}.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 76

Tabela 2.2 Emissões globais projetadas em 2030 associadas às políticas implementadas até o final de 2020 e as NDCs anunciadas antes da COP26, e diferenças de emissões associadas. As projeções de emissões para 2030 e as diferenças brutas nas emissões baseiam-se nas emissões de 52–56 $GtCO_2$–eq ano^{-1} em 2019, conforme pressuposto nos estudos do modelo subjacente[40]. (*confiança média*) {WGIII Tabela SPM.1} (Tabela 3.1, CSB.2)

Diferenças de emissão e implementação associadas às emissões globais projetadas em 2030 sob as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) e políticas implementadas

	De acordo com as políticas implementadas até o final de 2020 ($GtCO_2$eq/ano)	De acordo com as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) anunciadas antes da COP26	
		Elementos incondicionais ($GtCO_2$eq/ano)	Incluindo elementos condicionais ($GtCO_2$eq/ano)
Mediana das emissões globais projetadas (mín-máx)*	57 [52–60]	53 [50–57]	50 [47–55]
Diferença de implementação entre as políticas implementadas e as NDCs (mediana)	–	4	7
Diferença de emissões entre NDCs e trajetórias que limitam o aquecimento a 2ºC (>67%) com ação imediata	–	10–16	6–14
Diferença de emissões entre NDCs e trajetórias que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada com ação imediata	–	19–26	16–23

*Projeções de emissões para 2030 e diferenças brutas nas emissões baseiam-se nas emissões de 52-56 $GtCO_2$e/ano em 2019, como assumido em estudos de modelos subjacentes, *(confiança média)*

[40] A gama de emissões de GEE harmonizadas em 2019 entre as trajetórias [53–58 $GtCO_2$–eq] está nas faixas de incerteza de emissões avaliadas em 2019 no Capítulo 2 do WGIII [53–66 $GtCO_2$–eq].

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 77

As emissões globais projetadas de GEE das NDCs anunciadas antes da COP26 tornariam provável que o aquecimento excedesse 1,5°C e também dificultariam, após 2030, a limitação do aquecimento a menos de 2°C

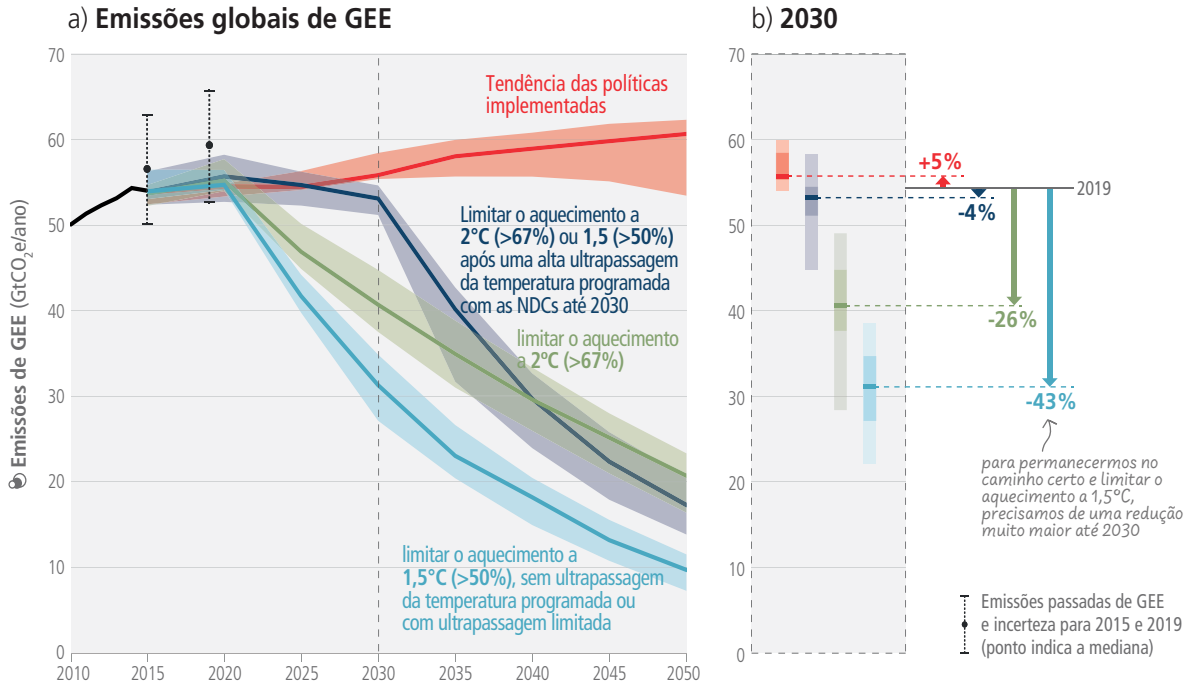


Figura 2.5 Emissões globais de GEE de trajetórias modeladas (funis no Painel a) e resultados projetados de emissões a partir de avaliações de políticas no curto prazo para 2030 (Painel b). O painel a mostra as emissões globais de GEE ao longo de 2015–2050 para quatro tipos de trajetórias globais modeladas e avaliadas:

– Tendência das políticas implementadas: Trajetórias com emissões de GEE projetadas no curto prazo, em linha com as políticas implementadas até o final de 2020 e estendidas com níveis de ambição comparáveis além de 2030 (29 cenários entre categorias C5–C7, WGIII Tabela SPM.2);

– Limitar a 2ºC (>67%) ou retornar ao aquecimento a 1,5ºC (>50%) após um alto *overshoot* ("ultrapassagem da temperatura"), NDCs até 2030: Trajetórias com emissões de GEE até 2030 associadas à implementação das NDCs anunciadas antes da COP26, seguidas de reduções aceleradas de emissões *que provavelmente* limitarão o aquecimento a 2ºC (C3b, WGIII Tabela SPM.2) ou retornarão ao aquecimento a 1,5ºC com uma probabilidade de 50% ou mais após um alto *overshoot* (subconjunto de 42 cenários de C2, WGIII Tabela SPM.2).

– Limitar a 2ºC (>67%) com ação imediata: Trajetórias que limitam o aquecimento a 2ºC (>67%) com ação imediata após 2020 (C3a, WGIII Tabela SPM.2).

– Limitar a 1,5ºC (>50%), com ou sem *overshoot* limitado ("sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada"): Trajetórias limitando o aquecimento a 1,5ºC, com ou sem *overshoot* limitado (C1, WGIII Tabela SPM.2 C1).

Todas estas trajetórias pressupõem ação imediata após 2020. As emissões passadas de GEE para 2010–2015 utilizadas para projetar os resultados do aquecimento global das trajetórias modeladas são mostradas por uma linha preta. O **painel b** mostra um resumo das faixas de emissão de GEE das trajetórias modeladas em 2030 e os resultados projetados das avaliações de políticas a curto prazo em 2030 do WGIII Capítulo 4.2 (Tabelas 4.2 e 4.3; mediana e faixa completa). As emissões de GEE são equivalentes ao CO_2 utilizando GWP100 do WGI do AR6. {WGIII Figura SPM.4, WGIII 3.5, 4.2, Tabela 4.2, Tabela 4.3, Caixa de Capítulo Transversal 4 no Capítulo 4} (Tabela 3.1, CSB.2)

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 78

Caixa de Seções Transversais.1: Entendendo as Emissões Líquidas Zero de CO_2 e as Emissões Líquidas Zero de GEE

Limitar o aquecimento global causado pelo ser humano a um nível específico requer limitar as emissões acumuladas de CO_2, alcançando emissões líquidas zero ou emissões líquidas negativas de CO_2, juntamente com fortes reduções em outras emissões de GEE (consulte 3.3.2). O aquecimento adicional futuro dependerá das emissões futuras, com o aquecimento total dominado pelas emissões acumuladas passadas e futuras de CO_2 {WGI SPM D.1.1, WGI Figura SPM.4; SR1.5 SPM A.2.2}.

Atingir emissões **líquidas zero de CO_2 difere de atingir emissões líquidas zero de GEE.** O cronograma das emissões líquidas zero para uma cesta de GEE depende da métrica de emissões, como o potencial de aquecimento global durante um período de 100 anos, escolhido para converter emissões que não são de CO_2 em emissões em CO_2 equivalentes (*alta confiança*). Entretanto, para uma determinada trajetória de emissões, a resposta climática física é independente da métrica escolhida (*alta confiança*) {WGI SPM D.1.8; WGIII Caixa TS.6, WGIII Caixa de Capítulo Transversal 2}.

Atingir emissões líquidas zero globais de GEE requer que todas as emissões remanescentes de CO_2 e emissões ponderadas pelo sistema métrico[41] que não sejam de GEE **CO_2** sejam contrabalançadas por remoções de **CO_2 armazenadas de forma durável (*alta confiança*).** Algumas emissões que não são de CO_2, tais como CH_4 e N_2O da agricultura, não podem ser totalmente eliminadas utilizando medidas técnicas existentes e previstas {WGIII SPM C.2.4, WGIII SPM C.11.4, Caixa de Capítulo Transversal 3}.

As emissões líquidas globais de CO_2 ou GEE podem ser alcançadas mesmo que alguns setores e regiões sejam emissores líquidos, desde que outros alcancem emissões líquidas negativas (consulte a Figura 4.1). O potencial e o custo de alcançar emissões líquidas zero ou mesmo emissões líquidas negativas variam conforme o setor e a região. Se e quando as emissões líquidas zero para um determinado setor ou região forem atingidas, depende de múltiplos fatores, incluindo o potencial para reduzir as emissões de GEE e realizar a remoção de dióxido de carbono, os custos associados e a disponibilidade de mecanismos de políticas para equilibrar as emissões e remoções entre setores e países. (*alta confiança*) {WGIII Caixa TS.6, WGIII Caixa de Capítulo Transversal 3}.

A adoção e implementação de metas de emissões líquidas zero por países e regiões também dependem de considerações de equidade e capacidade (*alta confiança*). A formulação de trajetórias para emissões líquidas zero por países se beneficiará da clareza no escopo, dos planos de ação e da justiça. O alcance das metas de emissão líquida zero depende de políticas, instituições e marcos para acompanhar o progresso. As trajetórias modeladas globais de menor custo têm demonstrado distribuir o esforço de mitigação desigualmente, e a incorporação de princípios de equidade poderia mudar o cronograma das emissões líquidas zero ao nível de país *(alta confiança*). O Acordo de Paris também reconhece que o pico de emissões ocorrerá mais tarde nos países em desenvolvimento do que nos países desenvolvidos (Artigo 4.1) {WGIII Caixa TS.6, WGIII Caixa de Capítulo Transversal 3, WGIII 14.3}.

Mais informações sobre os compromissos de emissões líquidas zero ao nível nacional são fornecidas na Seção 2.3.1, sobre o cronograma das emissões líquidas zero globais na Seção 3.3.2, e sobre aspectos setoriais das emissões líquidas zero na Seção 4.1.

Muitos países indicaram a intenção de atingir emissões líquidas zero de GEE ou emissões líquidas zero de CO_2 por volta de meados do século (Caixa de Seção Transversal 1). Mais de 100 países adotaram, anunciaram ou estão discutindo compromissos para emissões líquidas zero GEE, ou emissões líquidas zero de CO_2, cobrindo mais de dois terços das emissões globais de GEE. Um número cada vez maior de cidades está estabelecendo metas climáticas, incluindo metas de emissões líquidas zero de GEE. Muitas empresas e instituições também anunciaram metas de emissões líquidas zero nos últimos anos. Os vários compromissos de emissão líquida zero diferem entre países em termos de escopo e especificidade, e políticas limitadas estão em vigor até o momento para cumpri-los. {WGIII SPM C.6.4, WGIII TS.4.1, WGIII Tabela TS.1, WGIII 13.9, WGIII 14.3, WGIII 14.5}

Todas as estratégias de mitigação enfrentam desafios de implementação, incluindo riscos tecnológicos, escalas e custos (*alta confiança*). Quase todas as opções de mitigação também enfrentam barreiras institucionais que precisam ser abordadas para permitir sua aplicação em escala *(confiança média*). As atuais trajetórias de desenvolvimento podem criar barreiras comportamentais, espaciais, econômicas e sociais para uma mitigação acelerada em todas as escalas (*alta confiança*). As escolhas feitas pelos formuladores de políticas, cidadãos, setor privado e outras partes interessadas influenciam as trajetórias de desenvolvimento das sociedades (*alta confiança*). Fatores estruturais de circunstâncias e capacidades nacionais (por exemplo, recursos econômicos e naturais, sistemas políticos e fatores culturais e considerações de gênero) afetam a amplitude e a profundidade da governança climática (*confiança média*). A medida em que os atores da sociedade civil, atores políticos, empresas, jovens, trabalhadores, mídia, Povos Indígenas e comunidades locais estão engajados influencia o apoio político para a mitigação da mudança do clima e eventuais resultados políticos (*confiança média*). {WGIII SPM C.3.6, WGIII SPM E.1.1, WGIII SPM E.2.1, WGIII SPM E.3.3}

[41] Consulte a nota de rodapé 12 acima.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 79

A adoção de tecnologias de baixa emissão está atrasada na maioria dos países em desenvolvimento, particularmente os menos desenvolvidos, devido em parte às condições de capacitação mais fracas, incluindo financiamento limitado, desenvolvimento e transferência de tecnologia, e capacidade (*confiança média*). Em muitos países, especialmente aqueles com capacidade institucional limitada, vários efeitos colaterais adversos foram observados como resultado da difusão de tecnologia de baixas emissões, por exemplo, emprego de baixo valor e dependência de conhecimento e fornecedores estrangeiros *(confiança média*). A inovação de baixa emissão com o fortalecimento das condições de capacitação pode reforçar os benefícios do desenvolvimento, o que, por sua vez, pode criar feedbacks para um maior apoio público à política (*confiança média*). As barreiras persistentes e específicas de cada região também continuam a dificultar a viabilidade econômica e política da implantação de opções de mitigação da AFOLU (*confiança média*). As barreiras à implementação da mitigação da AFOLU incluem apoio institucional e financeiro insuficiente, incerteza sobre adicionalidade e trade-offs no longo prazo, governança fraca, propriedade insegura da terra, baixa renda e falta de acesso a fontes alternativas de renda, além do risco de reversão (*alta confiança*). {WGIII SPM B.4.2, WGIII SPM C.9.1, WGIII SPM C.9.3}

2.3.2. Lacunas e Barreiras para Adaptação

Apesar do progresso, existem lacunas de adaptação entre os níveis atuais de adaptação e os níveis necessários para responder aos impactos e reduzir os riscos climáticos (*alta confiança*). Enquanto o progresso na implementação da adaptação é observado em todos os setores e regiões (*confiança muito alta*), muitas iniciativas de adaptação priorizam a redução imediata e a curto prazo do risco climático, por exemplo, através da proteção física contra enchentes, reduzindo a oportunidade para a adaptação transformacional[42] (*alta confiança*). A maioria das adaptações observadas é fragmentada, pequena em escala, incremental, específica para um setor e focada mais no planejamento do que na implementação (*alta confiança*). Além disso, a adaptação observada está desigualmente distribuída entre as regiões e as maiores lacunas de adaptação existem entre os grupos de menor renda da população (*alta confiança*). No contexto urbano, as maiores diferenças de adaptação existem em projetos que gerenciam riscos complexos, por exemplo, no nexo alimentos–energia–água–saúde ou nas inter-relações entre qualidade do ar e risco climático (*alta confiança*). Muitas lacunas de financiamento, conhecimento e práticas permanecem para uma implementação, monitoramento e avaliação eficazes, e não se espera que os atuais esforços de adaptação atinjam os objetivos existentes (*alta confiança*). No atual ritmo de planejamento e implementação, a lacuna de adaptação continuará a crescer (*alta confiança*). {WGII SPM C.1, WGII SPM C.1.2, WGII SPM C.4.1, WGII TS.D.1.3, WGII TS.D.1.4}

Limites de adaptação flexíveis e rígidos[43] já foram atingidos em alguns setores e regiões, apesar da adaptação ter atenuado alguns impactos climáticos (*alta confiança*). Os ecossistemas que já atingem limites de adaptação rígidos incluem alguns recifes de corais de água quente, algumas zonas úmidas costeiras, algumas florestas tropicais e alguns ecossistemas polares e de montanha (*alta confiança*). Indivíduos e domicílios em áreas costeiras baixas na Australásia e Pequenas Ilhas e pequenos agricultores na América Central e América do Sul, África, Europa e Ásia atingiram limites flexíveis (*confiança média*), resultantes de restrições financeiras, de governança, institucionais e políticas e podem ser superados com o enfrentamento dessas restrições (*alta confiança*). A transição da adaptação incremental para a transformacional pode ajudar a superar limites de adaptação flexíveis (*alta confiança*). {WGII SPM C.3, WGII SPM C.3.1, WGII SPM C.3.2, WGII SPM C.3.3, WGII SPM.C.3.4, WGII 16 ES}

A adaptação não impede todas as perdas e danos, mesmo com uma adaptação efetiva e antes de atingir limites flexíveis e rígidos. As perdas e danos são desigualmente distribuídos entre sistemas, regiões e setores e não são tratados de forma abrangente pelos atuais acordos financeiros, institucionais e de governança, particularmente em países vulneráveis em desenvolvimento. (*alta confiança*) {WGII SPM.C.3.5}

Há evidências crescentes de má adaptação[44] em vários setores e regiões. Exemplos de má adaptação são observados em áreas urbanas (por exemplo, novas infraestruturas urbanas que não podem ser ajustadas de forma fácil ou acessível), agricultura (por exemplo, uso de irrigação de alto custo em áreas com projeção de condições de seca mais intensas), ecossistemas (por exemplo, supressão de incêndios em ecossistemas naturalmente adaptados a incêndios ou proteções físicas contra enchentes) e assentamentos humanos (por exemplo, ativos estagnados e comunidades vulneráveis que não podem se deslocar ou se adaptar e exigem um aumento nas redes de segurança social). A má adaptação afeta especialmente grupos marginalizados e vulneráveis (por exemplo, Povos Indígenas, minorias étnicas, domicílios de baixa renda, pessoas que vivem em assentamentos informais), reforçando e consolidando as desigualdades existentes. A má adaptação pode ser evitada através de um planejamento flexível, multissetorial, inclusivo e de longo prazo e da implementação de ações de adaptação com benefícios para muitos setores e sistemas. (*alta confiança*) {WGII SPM C.4, WGII SPM C.4.3, WGII TS.D.3.1}

Barreiras sistêmicas limitam a implementação de opções de adaptação em setores, regiões e grupos sociais vulneráveis (*alta confiança*). As principais barreiras incluem recursos limitados, falta de engajamento do setor privado e sociedade, mobilização insuficiente de financiamento, falta de compromisso político, pesquisa limitada e/ou lenta e baixa compreensão da ciência de adaptação e um baixo senso de urgência. A inequidade e a pobreza também limitam a adaptação,

[42] Consulte o Anexo I: Glossário.

[43] Limite de adaptação: O ponto no qual os objetivos (ou as necessidades do sistema) de um ator não podem ser assegurados de riscos intoleráveis por meio de ações adaptativas. Limite de adaptação rígido - Nenhuma ação adaptativa é possível para evitar riscos intoleráveis. Limite de adaptação flexível - Atualmente não há opções disponíveis para evitar riscos intoleráveis por meio de ações adaptativas.

[44] A má adaptação refere-se a ações que podem levar a um aumento do risco de resultados adversos relacionados ao clima, inclusive através do aumento das emissões de gases de efeito estufa, aumento ou deslocamento da vulnerabilidade à mudança do clima, resultados mais injustos, ou diminuição do bem-estar, agora ou no futuro. Na maioria das vezes, a má adaptação é uma consequência não intencional. Consulte o Anexo I: Glossário.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 80

levando a limites flexíveis e resultando em exposição e impactos desproporcionais para os grupos mais vulneráveis (*alta confiança*). As maiores lacunas de adaptação existem entre os grupos populacionais de menor renda (*alta confiança*). Como as opções de adaptação costumam ter longos períodos de implementação, o planejamento de longo prazo e a implementação acelerada, especialmente nesta década, são importantes para reduzir as lacunas de adaptação, reconhecendo que ainda há restrições em algumas regiões (*alta confiança*). A priorização de opções e transições de adaptação incremental para transformacional são limitadas devido a interesses constituídos, engessamentos (*lock-ins*) econômicos, dependências institucionais de trajetória e práticas, culturas, normas e sistemas de crenças prevalecentes (*alta confiança*). Muitas lacunas de financiamento, conhecimento e práticas permanecem para uma implementação, monitoramento e avaliação eficazes da adaptação (*alta confiança*), incluindo, falta de alfabetização climática em todos os níveis e disponibilidade limitada de dados e informações (*confiança média*); por exemplo, para a África, restrições severas de dados climáticos e inequidades no financiamento de pesquisa e liderança reduzem a capacidade de adaptação (*confiança muito alta*). {WGII SPM C.1.2, WGII SPM C.3.1, WGII TS.D.1.3, WGII TS.D.1.5, TS.D.2.4}

2.3.3. Falta de Financiamento como Barreira para a Ação Climática

Financiamento insuficiente e falta de estruturas políticas e incentivos para o financiamento são causas fundamentais das lacunas de implementação, tanto para mitigação quanto para adaptação (*alta confiança*). Os fluxos financeiros permaneceram fortemente concentrados na mitigação, são desiguais e se desenvolveram de forma heterogênea entre regiões e setores (*alta confiança*). Em 2018, os fluxos de financiamento climático público e privado mobilizado publicamente dos países desenvolvidos para os países em desenvolvimento ficaram abaixo da meta coletiva da UNFCCC e do Acordo de Paris de mobilizar USD 100 bilhões por ano até 2020 no contexto de ações significativas de mitigação e transparência na implementação (*confiança média*).

Os fluxos de financiamento público e privado para combustíveis fósseis ainda são maiores do que aqueles para adaptação e mitigação climática (*alta confiança*). A grande maioria do financiamento climático rastreado é direcionado para a mitigação (*confiança muito alta*). No entanto, as necessidades modeladas de investimentos anuais médios para 2020 a 2030 em cenários que limitam o aquecimento a 2ºC ou 1,5ºC são um fator de três a seis vezes maiores do que os níveis atuais, e os investimentos totais em mitigação (públicos, privados, domésticos e internacionais) precisariam aumentar em todos os setores e regiões (*confiança média*). Os desafios permanecem para os títulos verdes e produtos similares, em particular em torno da integridade e adicionalidade, bem como a aplicabilidade limitada desses mercados a muitos países em desenvolvimento (*alta confiança*). {WGII SPM C.3.2, WGII SPM C.5.4; WGIII SPM B.5.4, WGIII SPM E5.1}

Os atuais fluxos financeiros globais para adaptação, inclusive de fontes financeiras públicas e privadas, são insuficientes e limitam a implementação de opções de adaptação, especialmente em países em desenvolvimento (*alta confiança*). Há disparidades crescentes entre os custos estimados de adaptação e o financiamento documentado destinado à adaptação (*alta confiança*). Estima-se que as necessidades financeiras de adaptação sejam maiores do que as avaliadas no AR5, e a maior mobilização e acesso a recursos financeiros são essenciais para a implementação da adaptação e para reduzir as lacunas de adaptação (*alta confiança*). Os fluxos financeiros anuais destinados à adaptação para a África, por exemplo, são bilhões de dólares inferiores às estimativas mais baixas de custo de adaptação para a mudança do clima no curto prazo (*alta confiança*). Os impactos climáticos adversos podem reduzir ainda mais a disponibilidade de recursos financeiros, causando perdas e danos e impedindo o crescimento econômico nacional, aumentando ainda mais as restrições financeiras para a adaptação, principalmente para os países em desenvolvimento e os LDCs (*confiança média*). {WGII SPM C.1.2, WGII SPM C.3.2, WGII SPM C.5.4, WGII TS.D.1.6}

Sem mitigação e adaptação eficazes, as perdas e danos continuarão a afetar desproporcionalmente as populações mais pobres e mais vulneráveis. O apoio financeiro acelerado aos países em desenvolvimento de países desenvolvidos e outras fontes é um capacitador crítico para melhorar as ações de mitigação {WGIII SPM. E.5.3}. Muitos países em desenvolvimento carecem de dados abrangentes na escala necessária e não dispõem dos recursos financeiros adequados necessários para a adaptação para reduzir as perdas e danos econômicos e não econômicos associados. (*alta confiança)* {WGII Caixa de Capítulo Transversal PERDAS, WGII SPM C.3.1, WGII SPM C.3.2, WGII TS.D.1.3, WGII TS.D.1.5; WGIII SPM E.5.3}

Existem barreiras para redirecionar o capital para a ação climática, tanto dentro quanto fora do setor financeiro global. Essas barreiras incluem: a avaliação inadequada dos riscos relacionados ao clima e das oportunidades de investimento, a disparidade regional entre o capital disponível e as necessidades de investimento, os fatores de viés interno, níveis de endividamento dos países, vulnerabilidade econômica e capacidades institucionais limitadas. Os desafios vindos de fora do setor financeiro incluem: mercados de capital locais limitados; perfis de retorno de risco pouco atraentes, em particular devido a ambientes regulatórios ausentes ou fracos, inconsistentes com os níveis de ambição; capacidade institucional limitada para garantir salvaguardas; padronização, agregação, escalabilidade e replicabilidade de oportunidades de investimento e modelos de financiamento; e, um portifólio de projetos (*pipeline*) pronto para investimentos comerciais. *(alta confiança)*
{WGII SPM C.5.4; WGIII SPM E.5.2; SR15 SPM D.5.2}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 81

Caixa de Seção Transversal. 2: Cenários, Níveis de Aquecimento Global e Riscos

Cenários e trajetórias modelados[45] são usados para explorar emissões futuras, mudança do clima, impactos e riscos relacionados, e possíveis estratégias de mitigação e adaptação, sendo baseados em uma série de premissas, incluindo variáveis socioeconômicas e opções de mitigação. Estas são projeções quantitativas e não são previsões nem prognósticos. As trajetórias de emissão globais modeladas, inclusive aquelas baseadas em abordagens de custo efetividade, contêm premissas e resultados diferenciados regionalmente e devem ser avaliadas com o reconhecimento cuidadoso dessas premissas. A maioria não traz premissas explícitas sobre equidade global, justiça ambiental ou distribuição de renda intrarregional. O IPCC é neutro no que diz respeito às premissas subjacentes aos cenários na literatura avaliada neste relatório, que não abrange todos os futuros possíveis[46]. {SROCC Caixa SPM.1; SRCCL Caixa SPM.1; WGI Caixa SPM.1; WGII Caixa SPM.1; WGIII Caixa SPM.1}.

Desenvolvimento Socioeconômico, Cenários e Trajetórias

As cinco Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas (SSP1 a SSP5) foram concebidas para abranger uma série de desafios à mitigação e adaptação à mudança do clima. Para a avaliação dos impactos climáticos, risco e adaptação, as SSPs são usadas para exposição, vulnerabilidade e desafios futuros à adaptação. Dependendo dos níveis de mitigação de GEE, os cenários de emissões modelados com base nas SSPs podem ser consistentes com níveis baixos ou altos de aquecimento[47]. Há muitas estratégias diferentes de mitigação que poderiam ser consistentes com diferentes níveis de aquecimento global em 2100 (consulte a Figura 4.1). {WGI Caixa SPM.1; WGII Caixa SPM.1; WGIII Caixa SPM.1, WGIII Caixa TS.5, WGIII Anexo III; SRCCL Caixa SPM.1, Figura SPM.2}

O WGI avaliou a resposta climática a cinco cenários ilustrativos baseados em SSPs[48] que cobrem a gama de possíveis fatores antropogênicos da mudança do clima, encontrados na literatura. Estes cenários combinam pressupostos socioeconômicos, níveis de mitigação do clima, controle do uso do solo e da poluição do ar para aerossóis e precursores de ozônio que não são CH_4. Os cenários de emissões de GEE altas e muito altas (SSP3-7.0 e SSP5-8.5) têm emissões de CO_2 que aproximadamente dobram em relação aos níveis atuais até 2100 e 2050, respectivamente[49]. O cenário intermediário de emissões de GEE (SSP2-4.5) tem emissões de CO_2 que permanecem em torno dos níveis atuais até meados do século. Os cenários de emissões muito baixas e baixas de GEE (SSP1-1.9 e SSP1-2.6) têm emissões líquidas de CO_2 diminuindo para zero por volta de 2050 e 2070, respectivamente, seguidos por níveis variáveis de emissões líquidas negativas de CO_2. Além disso, as Trajetórias de Concentração Representativa (RCPs)[50] foram usadas pelo WGI e WGII para avaliar as mudanças regionais do clima, impactos e riscos. {WGI Caixa SPM.1} (Caixa de Seção Transversal.2, Figura 1)

No WGIII, foram avaliadas inúmeras trajetórias de emissões globais modeladas, das quais 1202 trajetórias foram categorizadas com base em seu aquecimento global projetado ao longo do século XXI, com categorias que variam de trajetórias que limitam o aquecimento a 1,5ºC com mais de 50% de probabilidade[51] com ou sem *overshoot* limitado ("sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada") (C1) a trajetórias que excedem 4ºC (C8). Os métodos para projetar o aquecimento global associado às trajetórias modeladas foram atualizados para garantir a consistência com a avaliação do WGI para o AR6 da resposta do sistema climático[52]. {WGIII Caixa SPM.1, WGIII Tabela 3.1} (Tabela 3.1, Caixa de Seção Transversal.2, Figura 1)

Níveis de Aquecimento Global (GWLs)

Para muitas variáveis climáticas e de risco, os padrões geográficos de mudanças nos agentes climáticos causadores de impactos[53] e nos impactos climáticos para um nível de aquecimento global[54] são comuns a todos os cenários considerados e independentes do momento em que esse nível é atingido. Isso motiva o uso de GWLs como uma dimensão de integração. {WGI Caixa SPM.1.4, WGI TS.1.3.2; WGII Caixa SPM.1} (Figura 3.1, Figura 3.2)

45 Na literatura, os termos trajetórias e cenários são utilizados de forma intercambiável, com o primeiro mais frequentemente utilizado em relação às metas climáticas. O WGI usou principalmente o termo cenários e o WGIII usou principalmente o termo trajetórias de mitigação e emissões modelados. O SYR usa principalmente cenários quando se refere ao WGI e trajetórias modeladas de emissões e mitigação quando se refere ao WGIII. {WGI Caixa SPM.1; WGIII nota de rodapé 44}

46 Cerca de metade de todas as trajetórias de emissões globais modeladas assumem abordagens econômicas que dependem de opções de mitigação/redução de menor custo globalmente. A outra metade analisa as políticas existentes e as ações diferenciadas por região e setor. As suposições subjacentes da população variam de 8,5 a 9,7 bilhões em 2050 e de 7,4 a 10,9 bilhões em 2100 (percentil 5–95) a partir de 7,6 bilhões em 2019. As suposições subjacentes sobre o crescimento global do PIB variam de 2,5 a 3,5% ao ano no período 2019–2050 e 1,3 a 2,1% ao ano no período 2050–2100 (percentil 5–95). {WGIII Caixa SPM.1}.

47 Os altos desafios de mitigação, por exemplo, devido a suposições de mudanças tecnológicas lentas, altos níveis de crescimento da população global e alta fragmentação, como na Trajetória Socioeconômica Compartilhada SSP3, podem tornar inviáveis as trajetórias modeladas que limitam o aquecimento a 2ºC (> 67%) ou menos (confiança média) {SRCCL Caixa SPM.1; WGIII SPM C.1.4}.

48 Cenários baseados na SSP são referidos como SSPx-y, onde "SSPx" se refere à Trajetória Socioeconômica Compartilhada descrevendo as tendências socioeconômicas subjacentes aos cenários, e "y" se refere ao nível de forçante radiativa (em watts por metro quadrado, ou Wm-2) resultante do cenário no ano 2100. {WGI SPM nota de rodapé 22}

49 Cenários de emissões muito altas tornaram-se menos prováveis, mas não podem ser descartados. Níveis de temperatura > 4ºC podem resultar de cenários de emissões muito altas, mas também podem ocorrer em cenários de emissões mais baixas se a sensibilidade climática ou os feedbacks do ciclo de carbono forem maiores do que a melhor estimativa.

50 Cenários baseados em RCP são referidos como RCPy, onde "y" se refere ao nível aproximado de forçante radiativa (em watts por metro quadrado, ou Wm-2) resultante do cenário no ano 2100. {WGII SPM nota de rodapé 21}.

51 Indica ">50%" neste relatório.

52 A resposta climática às emissões é investigada com modelos climáticos, percepções paleoclimáticas e outras linhas de evidência. Os resultados da avaliação são usados para classificar milhares de cenários através de modelos climáticos baseados em física (emuladores) {WGI TS.1.2.2}.

53 Consulte o Anexo I: Glossário.

54 Consulte o Anexo I: Glossário. Aqui, o aquecimento global é a temperatura média da superfície global de 20 anos em relação a 1850–1900. O tempo avaliado de quando um certo nível de aquecimento global é atingido sob um determinado cenário é definido aqui como o ponto médio do primeiro período médio de 20 anos consecutivos durante o qual a temperatura média da superfície global avaliada excede o nível de aquecimento global. {WGI SPM nota de rodapé 26, Caixa de Seção Transversal TS.1}

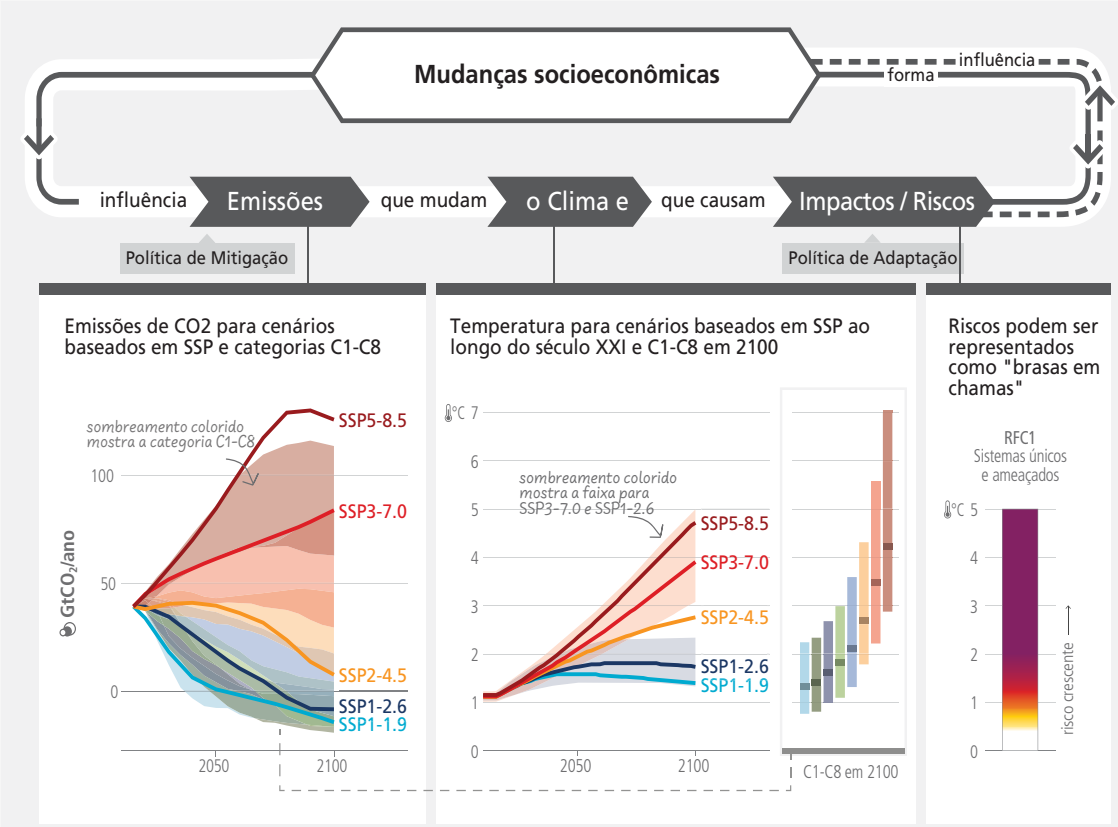
Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 82

Riscos

As interações dinâmicas entre ameaças relacionadas ao clima, exposição e vulnerabilidade da sociedade humana, espécies ou ecossistemas afetados resultam em riscos decorrentes da mudança do clima. O AR6 avalia os principais riscos entre setores e regiões, bem como fornece uma avaliação atualizada dos Motivos para Preocupação (RFCs) – cinco categorias globalmente agregadas de risco que avaliam o incremento de risco com o aumento da temperatura da superfície global. Os riscos também podem surgir de respostas de mitigação ou adaptação à mudança do clima quando a resposta não atinge seu objetivo pretendido, ou quando resulta em efeitos adversos para outros objetivos da sociedade. {WGII SPM A, WGII Figura SPM.3, WGII Caixa TS.1, WGII Figura TS.4; SR1.5 Figura SPM.2; SRCCL Figura SPM.2; SROCC Errata Figura SPM.3} (3.1.2, Caixa de Seção Transversal.2, Figura 1; Figura 3.3)

Cenários e níveis de aquecimento estruturam nosso entendimento em toda a cadeia de causa-efeito, desde emissões até mudança do clima e riscos

a) **Estrutura de avaliação integrada do AR6 sobre o clima futuro, impactos e mitigação**



b) **Cenários e trajetórias nos relatórios do Grupo de Trabalho do AR6**

Categoria no WGIII	Descrição da categoria	Cenários de emissões de GEE (SSPx-y*) no WGI e WGII	RCPy** no WGI e WGII
C1	limitar o aquecimento a 1,5°C (>50%), sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada	Muito baixa (SSP1-1.9)	
C2	retornar o aquecimento a 1,5°C (>50%) após uma alta ultrapassagem		
C3	limitar o aquecimento a 2°C (>67%)	Baixa (SSP1-2.6)	RCP2.6
C4	limitar o aquecimento a 2°C (>50%)		
C5	limitar o aquecimento a 2,5°C (>50%)		
C6	limitar o aquecimento a 3°C (>50%)	Intermediária (SSP2-4.5)	RCP 4.5
C7	limitar o aquecimento a 4°C (>50%)	Alta (SSP3-7.0)	
C8	exceder o aquecimento de 4°C (>50%)	Muito alta (SSP5-8.5)	RCP 8.5

c) **Determinantes de risco**



*A terminologia SSPx–y é usada, onde "SSPx" se refere à Trajetória Socioeconômica Compartilhada ou "SSP" descrevendo as tendências socioeconômicas subjacentes ao cenário, e "y" refere-se ao nível aproximado de forçante radiativa (em watts por metro quadrado, ou W m^{-2}) resultante do cenário no ano 2100.

**Os cenários do AR5 (RCPy), que informam parcialmente as avaliações dos WGI e WGII no AR6, são indexados a um conjunto similar de aproximadamente 2100 níveis de forçante radiativa (em Wm_{-2}). Os cenários dos SSP cobrem uma gama mais ampla de futuros de GEE e poluentes do ar do que os RCPs. São semelhantes, mas não idênticos, com diferenças nas trajetórias de concentração para diferentes GEE. A forçante radiativa geral tende a ser maior para os SSPs em comparação com os RCPs com a mesma denominação *(confiança média)*. {WGI TS.1.3.1}

*** *Overshoot* ("ultrapassagem") limitado refere-se a exceder 1,5°C de aquecimento global em até cerca de 0,1°C, alto *overshoot* em 0,1°C-0,3°C, em ambos os casos por até várias décadas.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 83

Caixa de Seção Transversal.2, Figura 1: Esquema da estrutura do AR6 para avaliar as futuras emissões de gases de efeito estufa, mudança do clima, riscos, impactos e mitigação. Painel (a) A estrutura integrada engloba política e desenvolvimento socioeconômico, trajetórias de emissões e respostas globais de temperatura da superfície aos cinco cenários considerados pelo WGI (SSP1–1.9, SSP1–2.6, SSP2–4.5, SSP3–7.0, e SSP5–8.5) e oito categorias globais de mudança de temperatura média (C1–C8) avaliadas pelo WGIII, e a análise de risco do WGII. A seta tracejada indica que a influência dos impactos/riscos nas mudanças socioeconômicas ainda não foi considerada nos cenários avaliados no AR6. As emissões incluem GEE, aerossóis e precursores de ozônio. As emissões de CO_2 são mostradas como um exemplo à esquerda. A temperatura da superfície global avaliada muda ao longo do século XXI em relação a 1850–1900 para os cinco cenários de emissões de GEE mostrados como um exemplo no centro. São indicadas faixas *muito prováveis* para SSP1-2.6 e SSP3-7.0. Os resultados de temperatura projetados em 2100 em relação a 1850–1900 são mostrados para as categorias C1 a C8 com mediana (linha) e a faixa combinada *muito provável* entre cenários (barra). À direita, os riscos futuros devidos ao aquecimento crescente são representados por uma figura de exemplo de "brasa em chamas" (consulte 3.1.2 para a definição de RFC1). **Painel (b)** Descrição e relação dos cenários considerados nos relatórios do Grupo de Trabalho do AR6. **Painel (c)** Ilustração do risco decorrente da interação do perigo (motivado pelas mudanças nos fatores de impacto climático) com a vulnerabilidade, exposição e resposta à mudança do clima. {WGI TS1.4, Figura
4.11; WGII Figura 1.5, WGII Figura 14.8; WGIII Tabela SPM.2, Figura 3.11}

Seção 3
Perspectivas de Clima e de Desenvolvimento no Longo Prazo

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 86

Seção 3: Perspectivas de Clima e de Desenvolvimento no Longo Prazo

3.1 Mudança do Clima no Longo Prazo, Impactos e Riscos Relacionados

O aquecimento futuro será impulsionado pelas emissões futuras e afetará todos os principais componentes do sistema climático, com todas as regiões passando por mudanças múltiplas e concomitantes. Muitos riscos relacionados ao clima são avaliados como sendo mais altos do que em avaliações anteriores, e os impactos projetados no longo prazo são até várias vezes maiores do que os observados atualmente. Os múltiplos riscos climáticos e não climáticos irão interagir, resultando em riscos compostos e em cascata entre setores e regiões. A elevação do nível do mar, bem como outras mudanças irreversíveis, continuará por milhares de anos, a taxas que dependem de emissões futuras. *(alta confiança)*

3.1.1. Mudança do Clima no Longo Prazo

A faixa de incerteza sobre as mudanças futuras avaliadas na temperatura da superfície global é mais estreita do que no AR5. Pela primeira vez em um ciclo de avaliação do IPCC, projeções de modelos múltiplos da temperatura da superfície global, do aquecimento dos oceanos e do nível do mar são limitadas utilizando observações e a avaliação da sensibilidade climática. A faixa *provável* de sensibilidade climática de equilíbrio foi reduzida para 2,5ºC–4,0ºC (com uma melhor estimativa de 3,0ºC) com base em múltiplas linhas de evidência[55], incluindo uma melhor compreensão dos *feedbacks* das nuvens. Para cenários de emissões relacionados, isso leva a faixas de incerteza mais estreitas do que no AR5 para a mudança de temperatura global projetada a longo prazo. {WGI A.4, WGI Caixa SPM.1, WGI TS.3.2, WGI 4.3}

O aquecimento futuro depende das futuras emissões de gases de efeito estufa (GEE), com a dominância do CO_2 líquido acumulado. As melhores estimativas avaliadas e as faixas *muito prováveis* de aquecimento para 2081–2100 em relação a 1850–1900 variam de 1,4ºC [1,0–1,8ºC] no cenário de emissões muito baixas de GEE (SSP1–1.9) a 2,7ºC [2,1ºC–3,5ºC] no cenário de emissões intermediárias de GEE (SSP2–4.5) e 4,4ºC [3,3ºC–5,7ºC] no cenário de emissões muito altas de GEE (SSP5–8.5)[56]. {WGI SPM B.1.1, WGI Tabela SPM.1, WGI Figura SPM.4} (Caixa de Seção Transversal.2, Figura 1)

Trajetórias modeladas consistentes com a continuação das políticas implementadas até o final de 2020 levam ao aquecimento global de 3,2 [2,2–3,5]ºC (faixa de 5–95%) até 2100 (*confiança média*) (consulte também a Seção 2.3.1). Trajetórias de >4ºC (≥50%) até 2100 implicariam uma reversão das atuais tendências tecnológicas e/ou políticas de mitigação (*confiança média*). No entanto, esse aquecimento poderia ocorrer em trajetórias de emissões de acordo com políticas implementadas até o final de 2020 se a sensibilidade climática ou os *feedbacks* do ciclo de carbono forem maiores do que a melhor estimativa (*alta confiança*). {WGIII SPM C.1.3}

O aquecimento global continuará a aumentar no curto prazo em quase todos os cenários considerados e trajetórias modeladas. São necessárias reduções profundas, rápidas e sustentadas das emissões de GEE, atingindo emissões líquidas zero de CO_2 e incluindo fortes reduções de emissões de outros GEE, em particular o CH_4, para limitar o aquecimento a 1,5ºC (>50%) ou menos de 2ºC (>67%) até o final do século (*alta confiança*). A melhor estimativa de atingir 1,5ºC de aquecimento global está na primeira metade da década de 2030 na maioria dos cenários considerados e trajetórias modeladas[57]. No cenário de emissões muito baixas de GEE (SSP1-1.9), as emissões de CO_2 atingem o nível zero por volta de 2050 e a melhor estimativa de aquecimento até o final do século é de 1,4ºC, após um *overshoot* ("ultrapassagem") temporário (consulte a Seção 3.3.4) de não mais que 0,1ºC acima de 1,5ºC de aquecimento global. O aquecimento global de 2ºC será ultrapassado durante o século XXI, a menos que reduções profundas de CO_2 e outras emissões de GEE ocorram nas próximas décadas.

Reduções profundas, rápidas e sustentadas nas emissões de GEE levariam a melhorias na qualidade do ar dentro de poucos anos, a reduções nas tendências da temperatura da superfície global discerníveis após cerca de 20 anos, e em períodos mais longos para

[55] Compreensão dos processos climáticos, registro instrumental, paleoclimas e restrições emergentes baseadas em modelos (consulte o Anexo I: Glossário). {WGI SPM nota de rodapé 21}

[56] As melhores estimativas [e faixas *muito prováveis*] para os diferentes cenários são: 1,4ºC [1,0ºC–1,8ºC] (SSP1–1.9); 1,8ºC [1,3ºC–2,4ºC] (SSP1–2.6); 2,7ºC [2,1ºC–3.5ºC] (SSP2–4.5); 3,6ºC [2,8ºC–4,6ºC] (SSP3–7.0); e 4,4ºC [3,3ºC–5,7ºC] (SSP5–8.5). {WGI Tabela SPM.1} (CSB.2)

[57] No curto prazo (2021–2040), é *muito provável* que o nível de aquecimento global de 1,5ºC seja excedido no cenário de emissões muito altas de GEE (SSP5–8.5), é *provável* que seja excedido no cenário de emissões intermediárias e altas de GEE (SSP2–4.5, SSP3–7.0), é *mais provável do que improvável* que seja excedido no cenário de emissões baixas de GEE (SSP1–2.6) e é *mais provável do que improvável* que seja alcançado no cenário de emissões muito baixas de GEE (SSP1–1.9). Em todos os cenários considerados pelo WGI, exceto no cenário de emissões muito altas, o ponto médio do primeiro período de 20 anos consecutivos em que o aquecimento global avaliado atinge 1,5ºC situa-se na primeira metade da década de 2030. No cenário de emissões muito altas de GEE, este ponto médio está no final da década de 2020. O intervalo mediano de cinco anos no qual um nível de aquecimento global de 1,5ºC é alcançado (50% de probabilidade) nas categorias de trajetórias modeladas consideradas no WGIII é 2030-2035. {WGI SPM B.1.3, WGI Caixa de Seção Transversal TS.1, WGIII Tabela 3.2} (Caixa de Seção Transversal.2)

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 87

muitos outros agentes climáticos causadores de impacto[58] (*alta confiança*). As reduções direcionadas das emissões de poluentes atmosféricos levam a melhorias mais rápidas na qualidade do ar em comparação com as reduções apenas das emissões de GEE, mas, no longo prazo, são projetadas melhorias adicionais em cenários que combinam esforços para reduzir os poluentes atmosféricos e as emissões de GEE (*alta confiança*)[59]. {WGI SPM B.1, WGI SPM B.1.3, WGI SPM D.1, WGI SPM D.2, WGI Figura SPM.4, WGI Tabela SPM.1, WGI Caixa de Seção Transversal TS.1; WGIII SPM C.3, WGIII Tabela SPM.2, WGIII Figura SPM.5, WGIII Caixa SPM.1 Figura 1, WGIII Tabela 3.2} (Tabela 3.1, Caixa de Seção Transversal 2, Figura 1)

Mudanças nas forçantes climáticas de vida curta (SLCF) resultantes dos cinco cenários considerados levam a um aquecimento global líquido adicional no curto e longo prazo (*alta confiança*). Políticas rigorosas simultâneas de mitigação da mudança do clima e de controle da poluição do ar limitam este aquecimento adicional e levam a fortes benefícios para a qualidade do ar (*alta confiança*). Em cenários de emissões altas e muito altas de GEE (SSP3–7.0 e SSP5–8.5), as mudanças combinadas nas emissões de SLCF, tais como CH_4, aerossol e precursores de ozônio, levam a um aquecimento global líquido em 2100 de *provavelmente* 0,4ºC–0,9ºC em relação a 2019. Isso se deve aos aumentos projetados na concentração atmosférica de CH_4, ozônio troposférico, hidrofluorcarbonos e, quando se considera um forte controle da poluição do ar, reduções dos aerossóis de resfriamento. Em cenários de emissões baixas e muito baixas de GEE (SSP1- 1.9 e SSP1-2.6), as políticas de controle da poluição do ar, reduções em CH_4 e outros precursores de ozônio levam a um resfriamento líquido, enquanto as reduções em aerossóis de resfriamento antropogênicos levam a um aquecimento líquido (*alta confiança*). Ao todo, isso causa um *provável* aquecimento líquido de 0,0ºC–0,3ºC devido às mudanças de SLCF em 2100 em relação a 2019 e fortes reduções na superfície global de ozônio e material particulado (*alta confiança*). {WGI SPM D.1.7, WGI Box TS.7} (CSB.2)

A continuidade das emissões de GEE afetará ainda mais todos os principais componentes do sistema climático, e muitas mudanças serão irreversíveis em escalas centenárias a milenares. Muitas mudanças no sistema climático se tornam maiores em relação direta com o aumento do aquecimento global. Com cada incremento adicional do aquecimento global, as mudanças nos extremos continuam a se tornar maiores. O aquecimento adicional levará a ondas de calor marítimas mais frequentes e intensas, sendo projetado para ampliar ainda mais o degelo de permafrost e a perda de cobertura de neve sazonal, geleiras, gelo terrestre e gelo marinho ártico (*alta confiança*). O aquecimento global contínuo é projetado para intensificar ainda mais o ciclo da água global, incluindo sua variabilidade, precipitação global das monções[60] e eventos climáticos e meteorológicos e estações muito úmidos e muito secos (*alta confiança*). A porção de terra global que passa por mudanças detectáveis na precipitação média sazonal é projetada para aumentar (*confiança média*) com precipitação e fluxos de águas superficiais mais variáveis na maioria das regiões de terra entre as estações (*alta confiança*) e de ano para ano (*confiança média*). Muitas mudanças devidas às emissões de GEE passadas e futuras são irreversíveis[61] em escalas centenárias a milenares, especialmente no oceano, nas calotas de gelo e no nível médio global do mar (consulte 3.1.3). A acidificação dos oceanos *(virtualmente certa*), a desoxigenação oceânica *(alta confiança*) e o nível médio global do mar (*virtualmente certo*) continuarão a aumentar no século 21, a taxas dependentes de emissões futuras. {WGI SPM B.2, WGI SPM B.2.2, WGI SPM B.2.3, WGI SPM B.2.5, WGI SPM B.3, WGI SPM B.3.1, WGI SPM B.3.2, WGI SPM B.4, WGI SPM B.5, WGI SPM B.5.1, WGI SPM B.5.3, WGI Figura SPM.8} (Figura 3.1)

Com o aumento do aquecimento global, cada região é projetada para sentir cada vez mais mudanças simultâneas e múltiplas em agentes climáticos causadores de impacto. Aumentos de agentes climáticos causadores de impacto de calor e reduções nos agentes climáticos causadores de impacto de frio, como temperaturas extremas, são projetados em todas as regiões *(alta confiança*). A 1,5ºC de aquecimento global, prevê-se que as precipitações fortes e as enchentes se intensifiquem e se tornem mais frequentes na maioria das regiões da África, Ásia (*alta confiança*), América do Norte (*confiança média a alta*) e Europa (*confiança média*). A 2ºC ou acima, estas mudanças se expandem para mais regiões e/ou se tornam mais significativas (*alta confiança*), e são projetadas secas agrícolas e ecológicas mais frequentes e/ou severas na Europa, África, Australásia e América do Norte, Central e do Sul (*média* a *alta confiança*). Outras mudanças regionais previstas incluem a intensificação de ciclones tropicais e/ou tempestades extratropicais (*confiança média*) e aumento da aridez e dos riscos de incêndio[62] (*confiança média* a *alta*). Ondas de calor e secas compostas tornam-se *provavelmente* mais frequentes, inclusive concomitantemente em múltiplos lugares (*alta confiança*). {WGI SPM C.2, WGI SPM C.2.1, WGI SPM C.2.2, WGI SPM C.2.3, WGI SPM C.2.4, WGI SPM C.2.7}

58 Consulte a Caixa de Seção Transversal.2

59 Com base em cenários adicionais.

60 Particularmente no Sul e Sudeste da Ásia, Leste da Ásia e Oeste da África, com exceção do extremo oeste do Sahel {WGI SPM B.3.3}

61 Consulte o Anexo I: Glossário.

62 Consulte o Anexo I: Glossário.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 88

Com cada incremento do aquecimento global, as mudanças regionais no clima médio e nos extremos se tornam mais generalizadas e pronunciadas.

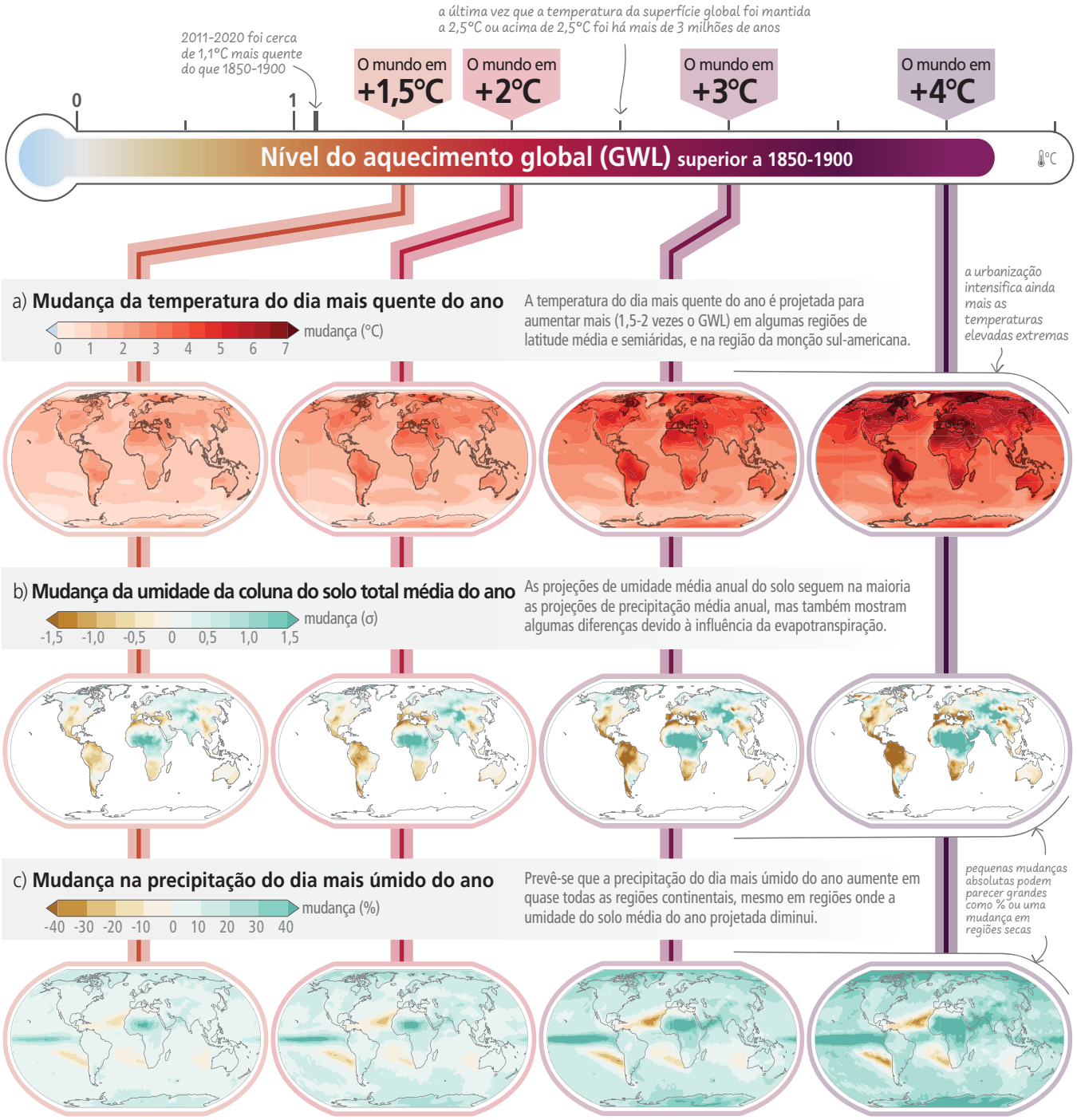


Figura 3.1: Mudanças projetadas de temperatura diária máxima do ano, umidade da coluna do solo total média do ano CMIP e precipitação diária máxima do ano a níveis de aquecimento global de 1,5°C, 2°C, 3°C, e 4°C em relação a 1850–1900. Mudança de temperatura máxima do ano (°C) simulado (**a**), (**b**) umidade da coluna do solo média do ano (desvio padrão), (**c**) mudança de precipitação diária máxima do ano (%). As mudanças correspondem às mudanças medianas do multimodelo da CMIP6. Nos painéis (b) e (c), grandes mudanças relativas positivas em regiões secas podem corresponder a pequenas mudanças absolutas. No painel (b), a unidade é o desvio padrão da variabilidade interanual da umidade do solo durante 1850–1900. O desvio padrão é uma métrica amplamente utilizada para caracterizar a gravidade da seca. Uma redução projetada na umidade do solo média por um desvio padrão corresponde às condições de umidade do solo típicas das secas que ocorreram aproximadamente uma vez a cada seis anos durante 1850–1900. O Atlas Interativo do WGI (https://interactive-atlas.ipcc.ch/) pode ser usado para explorar mudanças adicionais no sistema climático em toda a gama de níveis de aquecimento global apresentados nesta figura. {WGI Figura SPM.5, WGI Figura TS.5, WGI Figura 11.11, WGI Figura 11.16, WGI Figura 11.19} (CSB.2)

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 89

3.1.2. Impactos e Riscos Relacionados

Para um determinado nível de aquecimento, muitos riscos relacionados ao clima são avaliados como sendo mais altos do que no AR5 (*alta confiança*). Os níveis de risco[63] para todos os Motivos para Preocupação[64] (RFCs) são avaliados para se tornarem altos a muito altos em níveis mais baixos de aquecimento global em comparação com o que foi avaliado no AR5 (*alta confiança*). Isso se baseia em evidências recentes de impactos observados, melhor compreensão do processo e novos conhecimentos sobre exposição e vulnerabilidade dos sistemas humanos e naturais, incluindo limites para adaptação. Dependendo do nível de aquecimento global, os impactos avaliados a longo prazo serão até várias vezes maiores do que os atualmente observados (*alta confiança*) para 127 principais riscos identificados, por exemplo, em termos do número de pessoas e espécies afetadas. Os riscos, incluindo os riscos em cascata (consulte 3.1.3) e os riscos de *overshoot* ("ultrapassar temporariamente a temperatura de referência") (consulte 3.3.4), são projetados para se tornarem cada vez mais graves com cada incremento do aquecimento global (*confiança muito alta*). {WGII SPM B.3.3, WGII SPM B.4, WGII SPM B.5, WGII 16.6.3; SRCCL SPM A5.3} (Figura 3.2, Figura 3.3)

Os riscos climáticos para os sistemas naturais e humanos são maiores para o aquecimento global de 1,5ºC do que atualmente (1,1ºC), mas menores do que a 2ºC (*alta confiança*) (consulte Seção 2.1.2). Os riscos relacionados ao clima para a saúde, subsistência, segurança alimentar, abastecimento de água, segurança humana e crescimento econômico estão projetados para aumentar com o aquecimento global de 1,5ºC. Nos ecossistemas terrestres, 3–14% das dezenas de milhares de espécies avaliadas *provavelmente* enfrentarão um risco muito alto de extinção a um GWL de 1,5ºC. Os recifes de corais deverão diminuir adicionalmente em 70–90% a 1,5ºC de aquecimento global (*alta confiança*). Neste GWL, muitas geleiras de baixa elevação e pequenas geleiras ao redor do mundo perderiam a maioria de sua massa ou desapareceriam em décadas a séculos (*alta confiança*). As regiões com risco desproporcionalmente maior incluem ecossistemas árticos, regiões de terras secas, pequenos estados insulares em desenvolvimento e Países Menos Desenvolvidos (*alta confiança*). {WGII SPM B.3, WGII SPM B.4.1, WGII TS.C.4.2; SR1.5 SPM A.3, SR1.5 SPM B.4.2, SR1.5 SPM B.5, SR1.5 SPM B.5.1} (Figura 3.3)

A 2ºC de aquecimento global, os níveis de risco gerais associados à distribuição desigual dos impactos (RFC3), impactos agregados globais (RFC4) e eventos singulares em larga escala (RFC5) estariam em transição para altos (*confiança média*), aqueles associados a eventos climáticos extremos (RFC2) estariam em transição para muito altos (*confiança média*), e aqueles associados a sistemas únicos e ameaçados (RFC1) estariam muito altos (*alta confiança*) (Figura 3.3, painel a). Com um aquecimento de cerca de 2ºC, estima-se que as mudanças relacionadas ao clima na disponibilidade de alimentos e qualidade da dieta aumentam as doenças relacionadas à nutrição e o número de pessoas subnutridas, afetando dezenas (sob baixa vulnerabilidade e baixo aquecimento) a centenas de milhões de pessoas (sob alta vulnerabilidade e alto aquecimento), particularmente entre os domicílios de baixa renda em países de baixa e média renda na África Subsaariana, Sul da Ásia e América Central (*alta confiança*). Por exemplo, projeta-se que a disponibilidade de água para irrigação por meio do derretimento de neve diminua em algumas bacias hidrográficas dependentes de derretimento de neve em até 20% (*confiança média*). Os riscos da mudança do clima para as cidades, assentamentos e infraestruturas essenciais aumentarão drasticamente em médio e longo prazo com o aumento do aquecimento global, especialmente em locais já expostos a altas temperaturas, ao longo dos litorais ou com alta vulnerabilidade (*alta confiança*). {WGII SPM B.3.3, WGII SPM B.4.2, WGII SPM B.4.5, WGII SPM C.3.3, WGII TS.C.12.2} (Figura 3.3)

Com o aquecimento global a 3ºC, riscos adicionais em muitos setores e regiões atingem níveis altos ou muito altos, implicando em impactos sistêmicos generalizados, mudanças irreversíveis e muitos limites de adaptação adicionais (consulte seção 3.2) (*alta confiança*). Por exemplo, o risco muito alto de extinção de espécies endêmicas em *hotspots* de biodiversidade é projetado para aumentar pelo menos dez vezes se o aquecimento aumentar de 1,5ºC para 3ºC (*confiança média*). Os aumentos projetados de danos diretos por enchentes são maiores em 1,4–2 vezes a 2ºC e 2,5–3,9 vezes a 3ºC, em comparação com 1,5ºC de aquecimento global sem adaptação (*confiança média*). {WGII SPM B.4.1, WGII SPM B.4.2, WGII Figura SPM.3, WGII TS Apêndice AII, WGII Atlas Fig.AI.46} (Figura 3.2, Figura 3.3)

O aquecimento global de 4ºC e acima levará a impactos de longo alcance em sistemas naturais e humanos (*alta confiança*). Além dos

63 O nível de risco não detectável indica que nenhum impacto associado é detectável e atribuível à mudança do clima; o risco moderado indica que os impactos associados são ambos detectáveis e atribuíveis à mudança do clima com pelo menos *confiança média*, também levando em conta outros critérios específicos para os principais riscos; o risco alto indica impactos severos e generalizados que são considerados altos em um ou mais critérios para avaliar os principais riscos; e o nível de risco muito alto indica risco muito alto de impactos severos e a presença de irreversibilidade significativa ou a persistência de perigos relacionados ao clima, combinados com capacidade limitada de adaptação devido à natureza do perigo ou impactos/riscos. {WGII Figura SPM.3}

64 A estrutura de Motivos para Preocupação (RFC) comunica o entendimento científico sobre a acumulação de risco para cinco categorias amplas {WGII Figura SPM.3}. RFC1: Sistemas únicos e ameaçados: sistemas ecológicos e humanos, com faixas geográficas restritas, limitados pelas condições climáticas e com alto endemismo ou outras propriedades distintivas. Exemplos incluem recifes de corais, o Ártico e seus Povos Indígenas, geleiras de montanha e hotspots de biodiversidade. RFC2: Eventos climáticos extremos: riscos/impactos à saúde humana, meios de subsistência, ativos e ecossistemas decorrentes de eventos climáticos extremos, como ondas de calor, chuvas fortes, secas e incêndios florestais associados e inundações costeiras. RFC3: Distribuição de impactos: riscos/impactos que afetam desproporcionalmente grupos específicos devido à distribuição desigual de perigos físicos de mudanças do clima, exposição ou vulnerabilidade. RFC4: Impactos globais agregados: impactos aos sistemas socioecológicos que podem ser agregados globalmente em uma única métrica, tais como danos monetários, vidas afetadas, espécies perdidas ou degradação do ecossistema em escala global. RFC5: Eventos singulares em larga escala: mudanças relativamente grandes, abruptas e às vezes irreversíveis nos sistemas causados pelo aquecimento global, tais como instabilidade da calota de gelo ou desaceleração da circulação termoalina. Os métodos de avaliação incluem uma elicitação estruturada de especialistas baseada na literatura descrita no WGII SM16.6 e são idênticos ao AR5, mas aprimorados por uma abordagem estruturada para melhorar a robustez e facilitar a comparação entre AR5 e AR6. Para mais explicações sobre os níveis de risco global e Motivos para Preocupação, consulte WGII TS.AII. {WGII Figura SPM.3}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 90

4ºC de aquecimento, os impactos projetados nos sistemas naturais incluem a extinção local de ~50% das espécies marinhas tropicais (*confiança média*) e deslocamentos de bioma em 35% da área terrestre global (*confiança média*). Nesse nível de aquecimento, projeta-se que aproximadamente 10% da área terrestre global enfrentará tanto o aumento de vazões extremas altas quanto a diminuição de vazões extremas baixas, afetando, sem adaptação adicional, mais de 2,1 bilhões de pessoas (*confiança média*) e cerca de 4 bilhões de pessoas serão afetadas pela escassez de água (*confiança média*). A 4ºC de aquecimento, a área queimada global está projetada para aumentar em 50–70% e a frequência de incêndios em ~30% em comparação com a atual (*confiança média*). {WGII SPM B.4.1, WGII SPM B.4.2, WGII TS.C.1.2, WGII TS.C.2.3, WGII TS.C.4.1, WGII TS.C.4.4} (Figura 3.2, Figura 3.3)

Os impactos adversos projetados e as perdas e danos relacionados à mudança do clima aumentam com cada incremento do aquecimento global (*confiança muito alta*), mas também dependerão fortemente das trajetórias de desenvolvimento socioeconômico e das ações de adaptação para reduzir a vulnerabilidade e a exposição (*alta confiança*). Por exemplo, trajetórias de desenvolvimento com maior demanda por alimentos, ração animal e água, consumo e produção mais intensivos em recursos e melhorias tecnológicas limitadas resultam em maiores riscos de escassez de água em terras secas, degradação da terra e insegurança alimentar (*alta confiança*). Mudanças, por exemplo, na demografia ou nos investimentos em sistemas de saúde influenciam uma variedade de desdobramentos relacionados à saúde, incluindo morbidade e mortalidade relacionadas ao calor (Figura 3.3 Painel d). {WGII SPM B.3, WGII SPM B.4, WGII Figura SPM.3; SRCCL SPM A.6}

Com cada incremento de aquecimento, os impactos e riscos da mudança do clima se tornarão cada vez mais complexos e mais difíceis de gerenciar. Muitas regiões vivenciarão aumento na probabilidade de eventos compostos com maior aquecimento global, tais como ondas de calor e secas simultâneas, enchentes e incêndios compostos. Além disso, múltiplos fatores de risco climáticos e não climáticos, tais como perda de biodiversidade ou conflito violento, interagirão, resultando em um risco geral composto e riscos em cascata entre setores e regiões. Além disso, podem surgir riscos de algumas respostas destinadas a reduzir os riscos da mudança do clima, por exemplo, efeitos colaterais adversos de algumas medidas de redução de emissões e remoção de dióxido de carbono (CDR) (consulte 3.4.1). (*alta confiança*) {WGI SPM C.2.7, WGI Figura SPM.6, WGI TS.4.3; WGII SPM B.1.7, WGII B.2.2, WGII SPM B.5, WGII SPM B.5.4, WGII SPM C.4.2, WGII SPM B.5, WGII CCB2}

Abordagens de Modificação da Radiação Solar (SRM), se fossem implementadas, introduziriam uma ampla gama de novos riscos às pessoas e aos ecossistemas, que não são bem compreendidos. A SRM tem o potencial de compensar o aquecimento entre uma ou duas décadas e amenizar algumas ameaças climáticas, mas não restauraria o clima a um estado anterior, e a mudança do clima residual substancial ou sobrecompensadora ocorreria em escalas regionais e sazonais (*alta confiança*). Os efeitos de SRM dependeriam da abordagem específica utilizada[65], e uma cessação repentina e sustentada da SRM em um cenário de altas emissões de CO_2 causaria uma rápida mudança do clima (*alta confiança*). A SRM não impediria as concentrações atmosféricas de CO_2 de aumentar ou reduzir a acidificação dos oceanos resultante sob emissões antropogênicas contínuas *(alta confiança*). Grandes incertezas e diferenças de conhecimento estão associadas com o potencial das abordagens de SRM para reduzir os riscos da mudança do clima. A falta de uma governança robusta e formal de SRM representa riscos, pois a implantação por um número limitado de Estados poderia criar tensões internacionais. {WGI 4.6; WGII SPM B.5.5; WGIII 14.4.5.1; Caixa Transversal de Grupo de Trabalho SRM; SR1.5 SPM C.1.4}

[65] Várias abordagens de SRM foram propostas, incluindo injeção de aerossóis estratosféricos, clareamento de nuvens marinhas, modificações de albedo com base no solo e mudanças de albedo oceânico. Consulte o Anexo I: Glossário.

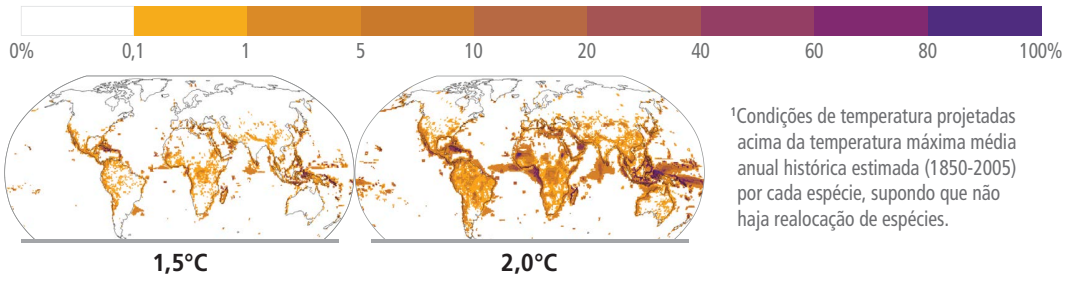
Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 91

A futura mudança do clima é projetada para aumentar a severidade dos impactos em sistemas naturais e humanos e aumentará as diferenças regionais

Exemplos de impactos sem adaptação adicional

a) Risco de perda de espécies

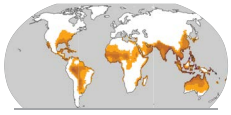
Porcentagem de espécies animais e ervas marinhas expostas a condições de temperaturas potencialmente perigosas[1, 2]



[1]Condições de temperatura projetadas acima da temperatura máxima média anual histórica estimada (1850-2005) por cada espécie, supondo que não haja realocação de espécies.

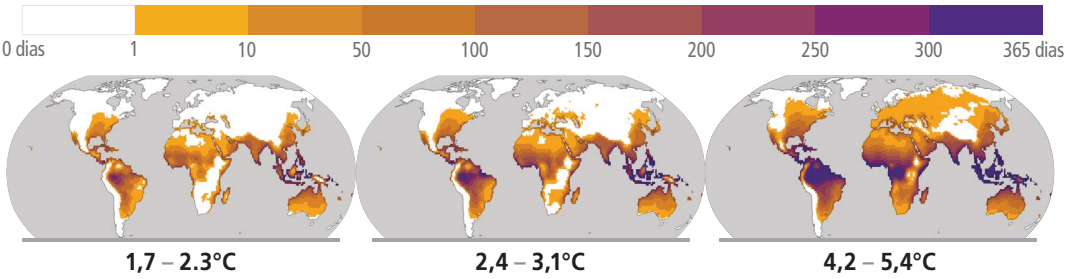
[2]Inclui 30.652 espécies de aves, mamíferos, répteis, anfíbios, peixes marinhos, invertebrados marinhos bentônicos, krill, cefalópodes, corais e algas marinhas.

b) Calor-umidade Riscos para a saúde humana



Histórico 1991–2005

Dias por ano em que as condições combinadas de temperatura e umidade representam um risco de mortalidade para os indivíduos[3]

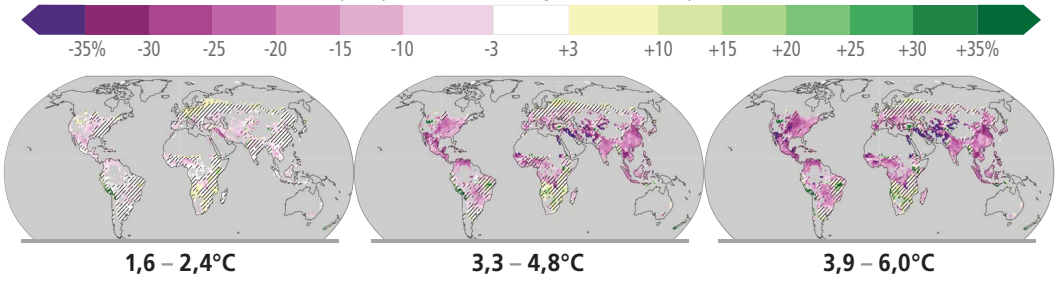


[3]Os impactos regionais projetados utilizam um limiar global além do qual a temperatura do ar de superfície média diária e a umidade relativa do ar podem induzir hipertermia, o que representa um risco de mortalidade. A duração e a intensidade das ondas de calor não são apresentadas aqui. Os resultados de saúde relacionados ao calor variam de acordo com o local e são altamente moderados por determinantes socioeconômicos, ocupacionais e outros não climáticos da saúde individual e da vulnerabilidade socioeconômica. O limite usado nesses mapas se baseia em um único estudo que sintetizou dados de 783 casos para determinar a relação entre as condições de calor e umidade e a mortalidade, com base principalmente em observações em climas temperados.

c) Impactos na produção de alimentos

c1) Produção de milho[4]

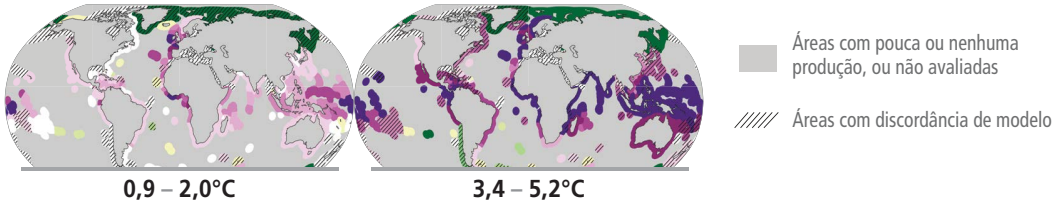
Mudanças (%) na produção



[4]Os impactos regionais projetados refletem respostas biofísicas às mudanças de temperatura, precipitação, radiação solar, umidade, vento e aumento de CO_2 no aumento e retenção de água em áreas atualmente cultivadas. Os modelos assumem que as áreas irrigadas não são limitadas pela água. Os modelos não representam pragas, doenças, mudanças futuras da agro-tecnologia e algumas respostas climáticas extremas.

c2) Rendimento da pesca[5]

Mudanças (%) no potencial máximo de captura



[5]Os impactos regionais projetados refletem as respostas da pesca e dos ecossistemas marinhos às condições físicas e biogeoquímicas dos oceanos, tais como temperatura, nível de oxigênio e produção primária líquida. Os modelos não representam mudanças nas atividades de pesca e algumas condições climáticas extremas. As mudanças projetadas nas regiões árticas têm baixa confiança devido às incertezas associadas à modelagem de múltiplos fatores de interação e respostas do ecossistema.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 92

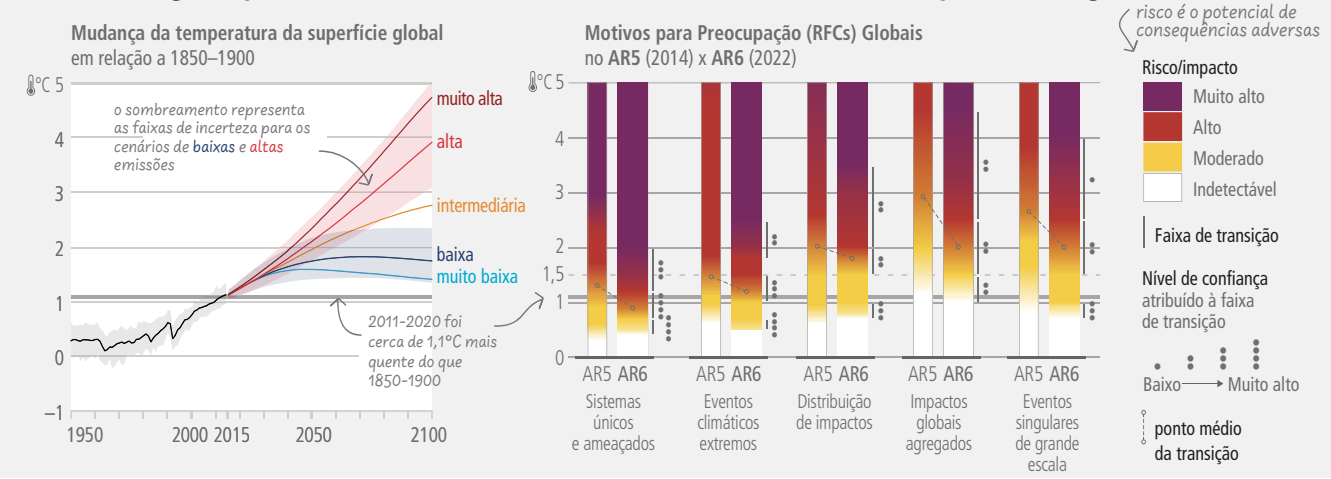
Figura 3.2: Riscos e impactos previstos devido à mudança do clima nos sistemas naturais e humanos em diferentes níveis de aquecimento global (GWLs) em relação aos níveis de 1850–1900. Os riscos e impactos previstos mostrados nos mapas são baseados nos resultados de diferentes subconjuntos de modelos de sistema terrestre usados para prever cada indicador de impacto sem adaptações adicionais. O WGII fornece uma avaliação adicional dos impactos sobre os sistemas humanos e naturais usando essas projeções e linhas de evidência adicionais. **(a)** Riscos de perdas de espécies, conforme indicado pela porcentagem de espécies avaliadas expostas a condições de temperatura potencialmente perigosas, conforme definido por condições além da temperatura anual média máxima histórica estimada (1850–2005) vivenciada por cada espécie, em GWLs de 1,5ºC, 2ºC, 3ºC e 4ºC. As projeções subjacentes de temperatura são de 21 modelos de sistemas terrestres e não consideram eventos extremos que impactam ecossistemas como o Ártico. **(b)** Risco à saúde humana, conforme indicado pelos dias por ano de exposição da população a condições hipotérmicas que representam um risco de mortalidade por condições de temperatura e umidade do ar de superfície para o período histórico (1991–2005) e em GWLs de 1,7ºC–2,3ºC (média = 1,9ºC; 13 modelos climáticos), 2,4ºC–3,1ºC (2,7ºC; 16 modelos climáticos) e 4,2ºC–5,4ºC (4,7ºC; 15 modelos climáticos). Intervalos interquartis dos WGLs até 2081-2100 segundo RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5.

O índice apresentado é consistente com as características comuns encontradas em muitos índices incluídos nas avaliações do WGI e do WGII. **(c)** Impactos na produção de alimentos: (c1) Mudanças na produção de milho em GWLs projetados de 1,6ºC–2,4ºC (2,0ºC), 3,3ºC–4,8ºC (4,1ºC) e 3,9ºC–6,0ºC (4,9ºC). A produção média muda de um conjunto de 12 modelos de safras, cada um impulsionado por rendimentos ajustados por viés de 5 modelos de sistemas terrestres do Projeto de Intercomparação e Aprimoramento de Modelos Agrícolas (AgMIP) e do Projeto do Modelo de Impacto Intersetorial e de Intercomparação (ISIMIP). Os mapas mostram 2080–2099 em comparação com 1986–2005 para as regiões em crescimento atual (>10 ha), com a faixa correspondente dos futuros níveis de aquecimento global mostrados em SSP1–2.6, SSP3–7.0 e SSP5–8.5, respectivamente. O tracejado indica áreas onde <70% das combinações do modelo clima-safra convergem com o sinal de impacto. (c2) Mudanças no potencial de captura de pescado máximo em 2081–2099 em relação a 1986–2005 a GWLs projetados de 0,9ºC–2,0ºC (1,5ºC) e 3,4ºC–5,2ºC (4,3ºC). GWLs em 2081–2100 sob RCP2.6 e RCP8.5. O tracejado indica onde os dois modelos de clima-pesca divergem da mudança. Grandes mudanças relativas em regiões de baixo rendimento podem corresponder a pequenas mudanças absolutas. A biodiversidade e a pesca na Antártica não foram analisadas devido a limitações de dados. A segurança alimentar também é afetada por falhas na colheita e na pesca não apresentadas aqui {WGII Fig. TS.5, WGII Fig. TS.9, WGII Anexo I: Atlas Global a Regional Figura AI.15, Figura AI.22, Figura AI.23, Figura AI.29; WGII 7.3.1.2, 7.2.4.1, SROCC Figura SPM.3} (3.1.2, Caixa de Seção Transversal.2)

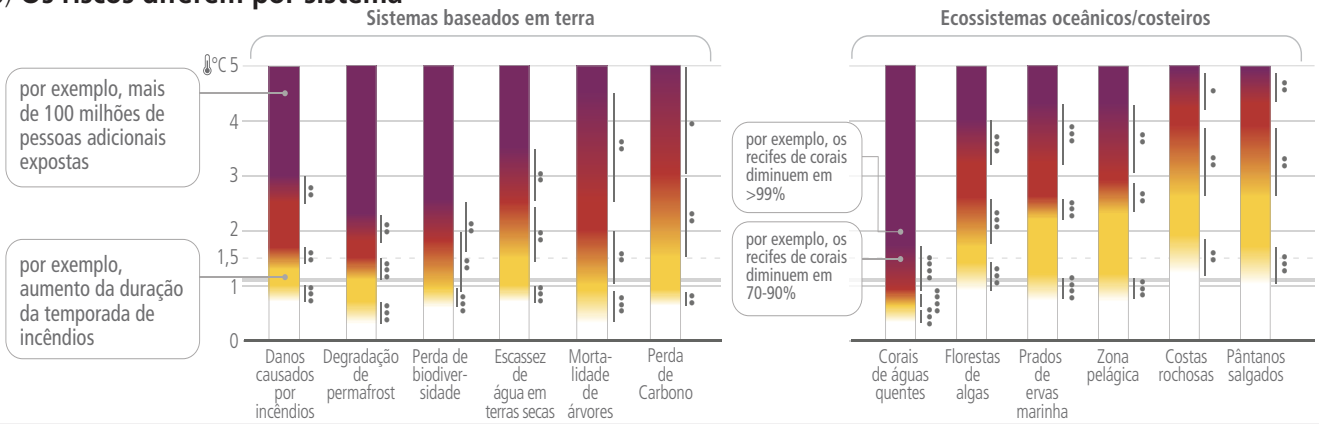
Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 93

Os riscos estão aumentando com cada incremento de aquecimento

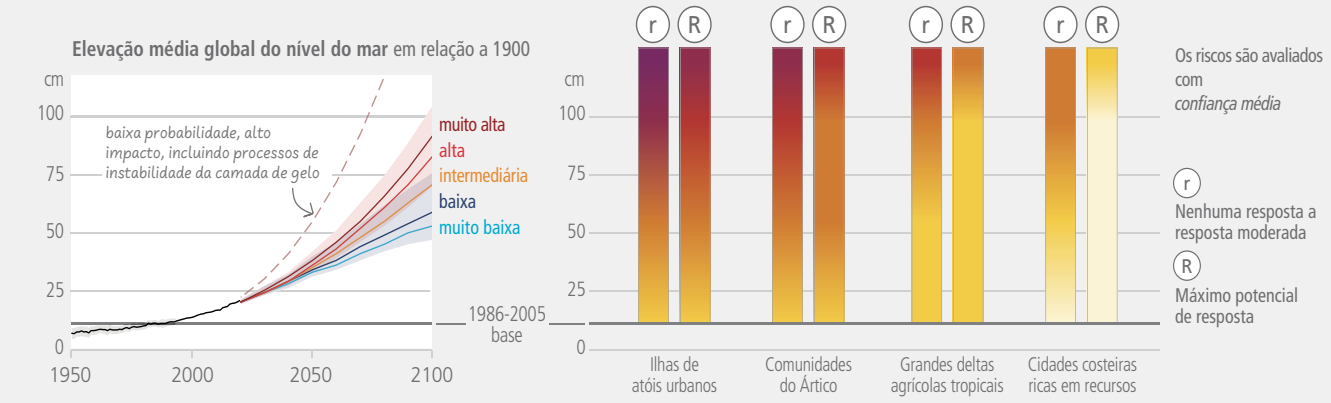
a) Avalia-se agora que os altos riscos ocorrerão em níveis mais baixos de aquecimento global



b) Os riscos diferem por sistema

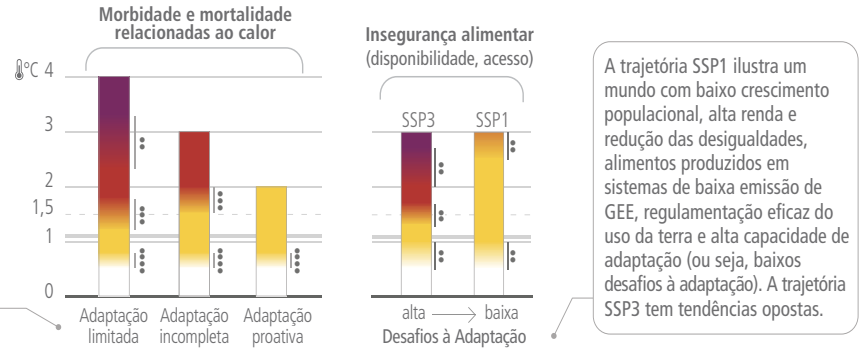


c) Os riscos para as geografias costeiras aumentam com a elevação do nível do mar e dependem das respostas



d) Adaptação e trajetórias socioeconômicas afetam os níveis de riscos relacionados ao clima

Adaptação limitada (falha na adaptação proativa; baixo investimento em sistemas de saúde); adaptação incompleta (planejamento de adaptação incompleta; investimento moderado em sistemas de saúde); adaptação proativa (gerenciamento da adaptação proativa; maior investimento em sistemas de saúde)



A trajetória SSP1 ilustra um mundo com baixo crescimento populacional, alta renda e redução das desigualdades, alimentos produzidos em sistemas de baixa emissão de GEE, regulamentação eficaz do uso da terra e alta capacidade de adaptação (ou seja, baixos desafios à adaptação). A trajetória SSP3 tem tendências opostas.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 94

e) **Exemplos dos principais riscos em diferentes regiões**

A ausência de diagramas de risco não implica a ausência de riscos numa região. O desenvolvimento de diagramas sintéticos para Pequenas Ilhas, Ásia e América Central e do Sul foi limitado devido à escassez de projeções climáticas adequadamente reduzidas, com incerteza na direção da mudança, diversidade de climatologias e contextos socioeconômicos entre países dentro de uma região e poucos números resultantes de projeções de impacto e risco para diferentes níveis de aquecimento.

Os riscos listados são de nível de confiança média, no mínimo:

Pequenas Ilhas
- Perda da biodiversidade terrestre, marinha e costeira e dos serviços ecossistêmicos
- Perda de vidas e ativos, risco à segurança alimentar e crise econômica devido à destruição de assentamentos e infraestrutura
- Declínio econômico e fracasso dos meios de subsistência da pesca, agricultura, turismo e perda da biodiversidade dos agroecossistemas tradicionais
- Redução da habitabilidade de ilhas de recifes e sem recifes, levando a um aumento do deslocamento
- Risco à segurança hídrica em quase todas as pequenas ilhas

América do Norte
- Consequências da saúde mental sensíveis ao clima, mortalidade e morbidade humana devido ao aumento da temperatura média, extremos climáticos e meteorológicos e perigos climáticos compostos
- Risco de degradação dos ecossistemas marinhos, costeiros e terrestres, incluindo perda de biodiversidade, função e serviços de proteção
- Risco aos recursos de água doce com consequências para os ecossistemas, menor disponibilidade de água superficial para a agricultura irrigada, outros usos humanos e qualidade de água degradada.
- Risco à segurança alimentar e nutricional através de mudanças na agricultura, pecuária, caça, pesca e produtividade e acesso à aquicultura
- Riscos para o bem-estar, os meios de subsistência e as atividades econômicas decorrentes de perigos climáticos em cascata e combinados, incluindo riscos para cidades costeiras, assentamentos e infraestrutura decorrentes do aumento do nível do mar

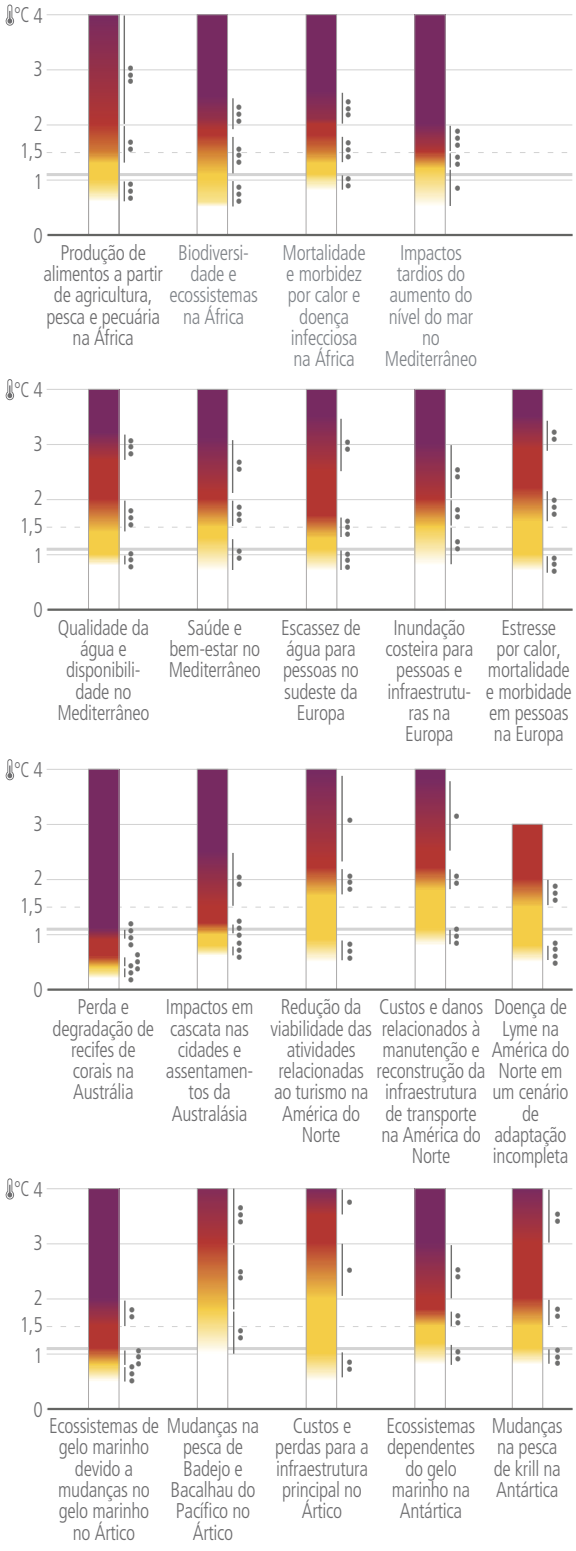
Europa
- Riscos para pessoas, economias e infraestruturas devido a inundações costeiras e internas
- Estresse e mortalidade das pessoas devido ao aumento das temperaturas e extremos de calor
- Crises nos ecossistemas marinhos e terrestres
- Escassez de água para múltiplos setores interligados
- Perdas na produção agrícola, devido ao calor composto e condições secas, e clima extremo

América Central e América do Sul
- Risco à segurança hídrica
- Efeitos graves sobre a saúde devido ao aumento das epidemias, em particular as doenças transmitidas por vetores
- Degradação dos ecossistemas dos recifes de corais devido ao embranquecimento de corais
- Risco à segurança alimentar devido a secas frequentes/extremas
- Danos à vida e infraestrutura devido a inundações, deslizamentos de terra, elevação do nível do mar, tempestades e erosão costeira

Aus-tralásia
- Degradação de recifes de corais tropicais rasos e valores de serviços ecossistêmicos e de biodiversidade associados
- Perda de sistemas humanos e naturais em áreas costeiras baixas devido à elevação do nível do mar
- Impacto sobre a subsistência e a renda devido ao declínio da produção agrícola
- Aumento da mortalidade e morbidade relacionadas ao calor para as pessoas e a vida selvagem
- Perda da biodiversidade alpina na Austrália devido a menos neve

Ásia
- Danos à infraestrutura urbana e impactos no bem-estar e saúde humana devido às inundações, especialmente em cidades costeiras e assentamentos
- Perda de biodiversidade e mudanças de habitat, bem como crises associadas nos sistemas humanos dependentes através dos ecossistemas de água doce, terrestres e oceânicos
- Embranquecimento de corais mais frequente e extenso e subsequente mortalidade de corais induzida pelo aquecimento e acidificação dos oceanos, aumento do nível do mar, ondas de calor marinhas e extração de recursos
- Diminuição dos recursos pesqueiros costeiros devido à elevação do nível do mar, diminuição da precipitação em algumas partes e aumento da temperatura
- Risco à segurança alimentar e hídrica devido ao aumento da temperatura extrema, variabilidade das chuvas e seca

África
- Extinção e redução de espécies ou perda irreversível de ecossistemas e seus serviços, incluindo ecossistemas de água doce, terrestres e oceânicos
- Risco para a segurança alimentar, risco de desnutrição (deficiência de micronutrientes) e perda da subsistência devido à redução da produção de alimentos a partir de agricultura, pecuária e pesca
- Riscos à saúde do ecossistema marinho e à subsistência nas comunidades costeiras
- Aumento da mortalidade e morbidade humana devido ao aumento do calor e das doenças infecciosas (incluindo doenças transmitidas por vetores e diarreicas)
- Redução da produção econômica e do crescimento, e aumento das taxas de desigualdade e pobreza
- Aumento do risco à segurança hídrica e energética devido à seca e ao calor



Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 95

Figura 3.3: Diagramas sintéticos de risco de avaliações globais e setoriais e exemplos dos principais riscos regionais. As brasas em chamas resultam de uma elicitação de especialistas baseada em literatura. **Painel (a)**: **Esquerda** - Mudanças de temperatura na superfície global em ºC em relação a 1850–1900. Tais mudanças foram obtidas combinando simulações do modelo CMIP6 com restrições observacionais baseadas no aquecimento simulado no passado, bem como uma avaliação atualizada da sensibilidade climática de equilíbrio. São mostradas faixas *muito prováveis* para os cenários de baixas e altas emissões de GEE (SSP1-2.6 e SSP3-7.0); **Direita** - Motivos para Preocupação Global, comparando as avaliações do AR6 (brasas grossas) e do AR5 (brasas finas). São mostrados diagramas para cada RFC, pressupondo nenhuma adaptação a adaptação moderada (ou seja, a adaptação é fragmentada, localizada e compreende ajustes incrementais às práticas existentes). Entretanto, a transição para um nível de risco muito alto tem ênfase na irreversibilidade e nos limites de adaptação. A linha horizontal denota o aquecimento global atual de 1,1ºC usado para separar os impactos observados passados abaixo da linha dos futuros riscos projetados acima dela. As linhas conectam os pontos médios da transição de risco moderado para alto no AR5 e AR6. **Painel (b)**: Riscos para sistemas em terra e ecossistemas oceânicos/costeiros.
Os diagramas mostrados para cada risco assumem pouca ou nenhuma adaptação. As caixas de texto indicam exemplos de impactos em um determinado nível de aquecimento. **Painel (c): Esquerda** - Mudança do nível do mar média global em centímetros em relação a 1900. As mudanças históricas (preto) são observadas por mareógrafos antes de 1992 e altímetros depois de 1992. As mudanças futuras até 2100 (linhas coloridas e sombreamento) são avaliadas de forma consistente com as restrições observacionais baseadas na emulação de modelos CMIP, camadas de gelo e geleiras, e os intervalos *prováveis* são mostrados para SSP1-2.6 e SSP3-7.0. **Direita** – Avaliação do risco combinado de inundações costeiras, erosão e salinização para quatro geografias costeiras ilustrativas em 2100, devido à mudança do nível médio e extremo do mar, sob dois cenários de resposta, em relação ao período base do SROCC (1986–2005) e indicando o período base do AR6 do IPCC (1995–2014). A avaliação não considera as mudanças no nível extremo do mar além daquelas diretamente induzidas pelo aumento médio do nível do mar; os níveis de risco poderiam aumentar se outras mudanças nos níveis extremos do mar fossem consideradas (por exemplo, devido a mudanças na intensidade dos ciclones). "Nenhuma resposta a resposta moderada" descreve os esforços até hoje (ou seja, nenhuma outra ação significativa ou novos tipos de ações). A "resposta máxima potencial" representa uma combinação de respostas implementadas em toda sua extensão, portanto, esforços adicionais significativos em comparação com os atuais, assumindo o mínimo de barreiras financeiras, sociais e políticas. Os critérios de avaliação incluem exposição e vulnerabilidade (densidade de ativos, nível de degradação dos ecossistemas de proteção terrestres e marinhos), riscos costeiros (inundação, erosão da linha costeira, salinização), respostas in-situ (defesas costeiras projetadas com alto grau de engenharia, restauração de ecossistemas ou criação de novas áreas de proteção natural e gerenciamento de subsidência) e realocação planejada. A realocação planejada refere-se à retirada ou reassentamento gerenciado. O deslocamento forçado não é considerado nesta avaliação. O termo resposta é usado aqui ao invés de adaptação, porque algumas respostas, como o recuo, podem ou não ser consideradas adaptação. **Painel (d)**: **Esquerda** - Resultados da saúde humana sensíveis ao calor sob três cenários de eficácia de adaptação. Os diagramas são truncados no valor inteiro ºC mais próximo na faixa de variação de temperatura em 2100 sob três cenários de SSP. **Direita** - Riscos associados à segurança alimentar devido à mudança do clima e aos padrões de desenvolvimento socioeconômico. Os riscos à segurança alimentar incluem disponibilidade e acesso a alimentos, incluindo a população em risco de fome, aumentos no preço dos alimentos e aumentos nos anos de vida ajustados por deficiência atribuíveis ao baixo peso infantil. Os riscos são avaliados para duas trajetórias socioeconômicas contrastadas (SSP1 e SSP3), excluindo os efeitos de políticas de mitigação e adaptação específicas. **Painel (e)**: Exemplos dos principais riscos regionais. Os riscos identificados são de nível de *confiança média*, no mínimo. Os principais riscos são identificados com base na magnitude das consequências adversas (abrangência das consequências, grau de mudança, irreversibilidade das consequências, potencial para limiares de impacto ou pontos de inflexão, potencial para efeitos em cascata além dos limites do sistema); probabilidade de consequências adversas; características temporais do risco; e capacidade de responder ao risco, por exemplo, por adaptação. {WGI Figura SPM.8; WGII SPM B.3.3, WGII Figura SPM.3, WGII SM 16.6, WGII SM 16.7.4; SRCCL Figura SPM.2; SROCC Figura SPM.3d; SROCC SPM.5a; SROCC 4SM; SRCCL 7.3.1; SRCCL 7SM} (CSB.2)

3.1.3. Probabilidade e Riscos de Mudanças Abruptas e Irreversíveis

A probabilidade de mudanças abruptas e irreversíveis e seus impactos aumentam com o aumento dos níveis de aquecimento global (*alta confiança*). À medida que os níveis de aquecimento aumentam, aumentam também os riscos de extinção de espécies ou perda irreversível da biodiversidade em ecossistemas como florestas (*confiança média*), recifes de corais (*confiança muito alta*) e em regiões árticas (*alta confiança*). Riscos associados a eventos singulares de grande escala ou pontos de inflexão, tais como instabilidade da calota de gelo ou perda de ecossistemas de florestas tropicais, transicionam para alto risco entre 1,5ºC–2,5ºC (*confiança média*) e para risco muito alto entre 2,5ºC–4ºC (*baixa confiança*). A resposta dos ciclos biogeoquímicos às perturbações antropogênicas pode ser abrupta em escalas regionais e irreversível em escalas de tempo decadal a centenária (*alta confiança*). A probabilidade de cruzar limites regionais incertos aumenta com o aquecimento adicional (*alta confiança*). {WGI SPM C.3.2, WGI Box TS.9, WGI TS.2.6; WGII Figura SPM.3, WGII SPM B.3.1, WGII SPM B.4.1, WGII SPM B.5.2, WGII Tabela TS.1, WGII TS.C.1, WGII TS.C.13.3; SROCC SPM B.4}

A elevação do nível do mar é inevitável por séculos a milênios devido ao contínuo aquecimento profundo do oceano e ao derretimento das calotas de gelo, e o nível do mar permanecerá elevado por milhares de anos (*alta confiança*). A elevação média global do nível do mar continuará no século XXI (*virtualmente certo*), com a elevação regional relativa do nível do mar projetada dentro de 20% da média global ao longo de dois terços da costa global (*confiança média*). A magnitude, a taxa, o momento de superação de limiares e o comprometimento no longo prazo da elevação do nível do mar dependem das emissões, com emissões mais elevadas levando a taxas maiores e mais rápidas de elevação do nível do mar. Devido à elevação relativa do nível do mar, os eventos extremos do nível do mar que ocorreram uma vez por século no passado recente deverão ocorrer pelo menos anualmente em mais da metade de todos os locais com marégrafos até 2100 e os riscos para os ecossistemas costeiros, pessoas e infraestrutura continuarão a aumentar após 2100 (*alta confiança*). A níveis sustentáveis de aquecimento entre 2ºC e 3ºC, as calotas de gelo da Groenlândia e do Oeste da Antártida serão perdidas quase completa e irreversivelmente ao longo de vários milênios (*evidências limitadas*). A probabilidade e a taxa de perda de massa de gelo aumentam com o aumento da temperatura da superfície global *(alta confiança*). Durante os próximos 2000 anos, o nível médio global do mar subirá cerca de 2–3 m se o aquecimento for limitado a 1,5ºC, e 2–6 m se for limitado a 2ºC *(baixa confiança*).

As projeções de elevação global multimilenar do nível médio do mar são consistentes com os níveis reconstruídos durante os períodos de clima quente passados: o nível médio do mar global era *muito provavelmente* 5–25 m mais alto do que hoje cerca de 3 milhões de anos atrás, quando as temperaturas globais eram 2,5ºC–4ºC mais altas do que 1850–1900

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 96

(*confiança média*). Outros exemplos de mudanças inevitáveis no sistema climático devido a prazos de resposta multidecadais ou mais longos incluem o derretimento contínuo das geleiras (*confiança muito alta*) e a perda de carbono de permafrost (*alta confiança*). {WGI SPM B.5.2, WGI SPM B.5.3, WGI SPM B.5.4, WGI SPM C.2.5, WGI Caixa TS.4, WGI Caixa TS.9, WGI 9.5.1; WGII TS C.5; SROCC SPM B.3, SROCC SPM B.6, SROCC SPM B.9} (Figura 3.4)

A probabilidade de resultados de baixa probabilidade associados a impactos potencialmente muito grandes aumenta com níveis mais altos de aquecimento global (*alta confiança*). Não se pode descartar um aquecimento substancialmente acima da faixa *muito provável* avaliada para um determinado cenário, e há uma *alta confiança* que isso levaria a mudanças regionais ainda mais significativas do que as avaliadas em muitos aspectos do sistema climático. Resultados de baixa probabilidade e alto impacto podem ocorrer em escalas regionais mesmo para o aquecimento global na faixa *muito provável* avaliada para um determinado cenário de emissões de GEE. A elevação média global do nível do mar acima da faixa *provável* – aproximando-se de 2 m até 2100 e acima de 15 m até 2300 sob um cenário de emissões de GEE muito elevadas (SSP5–8.5) (*baixa confiança*) – não pode ser descartada devido à incerteza profunda dos processos da camada de gelo[66] e teria impactos severos sobre as populações em zonas costeiras de baixa elevação. Se o aquecimento global aumentar, alguns eventos extremos compostos[67] se tornarão mais frequentes, com maior probabilidade de intensidades, durações ou extensão espacial sem precedentes (*alta confiança*). *É muito provável que* a Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico enfraqueça ao longo do século XXI para todos os cenários considerados (*alta confiança*), porém não se espera um colapso abrupto antes de 2100 (*confiança média*). Se esse evento de baixa probabilidade ocorresse, *muito provavelmente* causaria mudanças abruptas nos padrões climáticos regionais e no ciclo da água, tais como um deslocamento para o sul no cinturão de chuva tropical, e grandes impactos nos ecossistemas e nas atividades humanas. Uma sequência de grandes erupções vulcânicas explosivas em algumas décadas, como ocorreu no passado, é um evento de baixo impacto que levaria a um resfriamento substancial em escala global e perturbações climáticas regionais durante várias décadas {WGI SPM B.5.3, WGI SPM C.3, WGI SPM C.3.1, WGI SPM C.3.2, WGI SPM C.3.3, WGI SPM C.3.4, WGI SPM C.3.5, WGI Figura SPM.8, WGI Caixa TS.3, WGI Figura TS.6, WGI Caixa 9.4; WGII SPM B.4.5, WGII SPM C.2.8; SROCC SPM B.2.7}. (Figura 3.4, Caixa de Seção Transversal.2)

3.2 Opções e Limites de Adaptação no Longo Prazo

Com o aumento do aquecimento, as opções de adaptação se tornarão mais restritas e menos eficazes. Em níveis mais altos de aquecimento, as perdas e danos aumentarão e sistemas humanos e naturais adicionais atingirão limites de adaptação. Soluções integradas e transversais multissetoriais aumentam a eficácia da adaptação. A má adaptação pode criar engessamento de vulnerabilidade, exposições e riscos, mas pode ser evitada pelo planejamento no longo prazo e pela implementação de ações de adaptação que sejam flexíveis, multissetoriais e inclusivas. *(alta confiança).*

A eficácia da adaptação para reduzir o risco climático é documentada para contextos, setores e regiões específicos (*alta confiança*) e diminuirá com o aumento do aquecimento (*alta confiança*)[68]. Por exemplo, as respostas comuns de adaptação na agricultura – adotando melhores cultivares e práticas agronômicas, e mudanças nos padrões de cultivo e sistemas de cultivo – se tornarão menos eficazes de 2ºC para níveis mais altos de aquecimento (*alta confiança*). A eficácia da maioria das opções de adaptação relacionadas à água para reduzir os riscos projetados diminui com o aumento do aquecimento (*alta confiança*). As adaptações para geração de energia hidrelétrica e termoelétrica são eficazes na maioria das regiões até 1,5ºC–2ºC, com eficácia decrescente em níveis mais altos de aquecimento (*confiança média*). A adaptação baseada em ecossistemas é vulnerável aos impactos da mudança do clima, apresentando menor eficácia com o aumento do aquecimento global (*alta confiança*). Globalmente, as opções de adaptação relacionadas a sistemas agroflorestais e à silvicultura têm uma queda acentuada na eficácia a 3ºC, com um aumento substancial do risco residual (*confiança média*). {WGII SPM C.2, WGII SPM C.2.1, WGII SPM C.2.5, WGII SPM C.2.10, WGII Figura TS.6 Painel (e), 4.7.2}

[66] Este resultado é caracterizado por uma incerteza profunda: sua probabilidade desafia a avaliação quantitativa, mas é considerada devido ao seu alto impacto potencial. {WGI Caixa TS.1; WGII Caixa de Capítulo Transversal PROFUNDA}

[67] Consulte o Anexo I: Glossário. Exemplos de eventos extremos compostos são ondas de calor e secas simultâneas ou enchentes compostas. {WGI SPM Nota de rodapé 18}

[68] Há limitações para avaliar o escopo total das opções de adaptação disponíveis no futuro, já que nem todas as possíveis respostas futuras de adaptação podem ser incorporadas em modelos de impacto climático, e as projeções de adaptação futura dependem das tecnologias ou abordagens atualmente disponíveis {WGII 4.7.2}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 97

Com o aumento do aquecimento global, mais limites à adaptação serão atingidos (*alta confiança*) e as perdas e danos, fortemente concentrados entre as populações vulneráveis mais pobres, aumentarão (*alta confiança*). Já abaixo de 1,5ºC, as respostas de adaptação autônomas e evolutivas dos ecossistemas terrestres e aquáticos enfrentarão cada vez mais limites rígidos (*alta confiança*) (Seção 2.1.2). Acima de 1,5ºC, algumas medidas de adaptação baseadas em ecossistemas perderão sua eficácia em proporcionar benefícios às pessoas, pois esses ecossistemas atingirão limites de adaptação rígidos (*alta confiança*). Adaptação para enfrentar os riscos de estresse térmico, mortalidade por calor e redução das capacidades de trabalho ao ar livre para humanos enfrentam limites flexíveis e rígidos em regiões que se tornam significativamente mais severas a 1,5ºC e são particularmente relevantes para regiões com climas quentes (*alta confiança*). Acima de 1,5ºC de nível de aquecimento global, os recursos limitados de água doce representam um possível limite rígido para pequenas ilhas e para regiões dependentes do derretimento das geleiras e da neve (*confiança média*). Em 2ºC, são projetados limites flexíveis para diversas culturas de produtos básicos, particularmente em regiões tropicais (*alta confiança*). Em 3ºC, são projetados limites flexíveis para algumas medidas de gerenciamento de água para muitas regiões, com limites rígidos projetados para partes da Europa (*confiança média*). {WGII SPM C.3, WGII SPM C.3.3, WGII SPM C.3.4, WGII SPM C.3.5, WGII SPM C.3.2, WGII TS.D.2.2, WGII TS.D.2.3; SR1.5 SPM B.6; SROCC SPM C.1}

Soluções integradas e transversais multissetoriais aumentam a eficácia da adaptação. Por exemplo, o planejamento inclusivo, integrado e de longo prazo nas escalas local, municipal, subnacional e nacional, juntamente com sistemas eficazes de regulação e monitoramento e recursos e capacidades financeiras e tecnológicas promovem a transição dos sistemas urbanos e rurais. Há uma gama de opções de adaptação transversais, tais como gestão de risco de desastres, sistemas de alerta precoce, serviços climáticos e distribuição e compartilhamento de riscos que têm ampla aplicabilidade entre setores e oferecem maiores benefícios a outras opções de adaptação quando combinadas. A transição da adaptação incremental para a transformacional, e o endereçamento de uma série de restrições, principalmente nos domínios financeiro, de governança, institucional e político, pode ajudar a superar limites de adaptação flexíveis. Entretanto, a adaptação não impede todas as perdas e danos, mesmo com uma adaptação efetiva e antes de atingir limites flexíveis e rígidos. (*alta confiança*) {WGII SPM C.2, WGII SPM C.2.6, WGII SPM.C.2.13, WGII SPM C.3.1, WGII SPM.C.3.4, WGII SPM C.3.5, WGII Figura TS.6 Painel (e)}

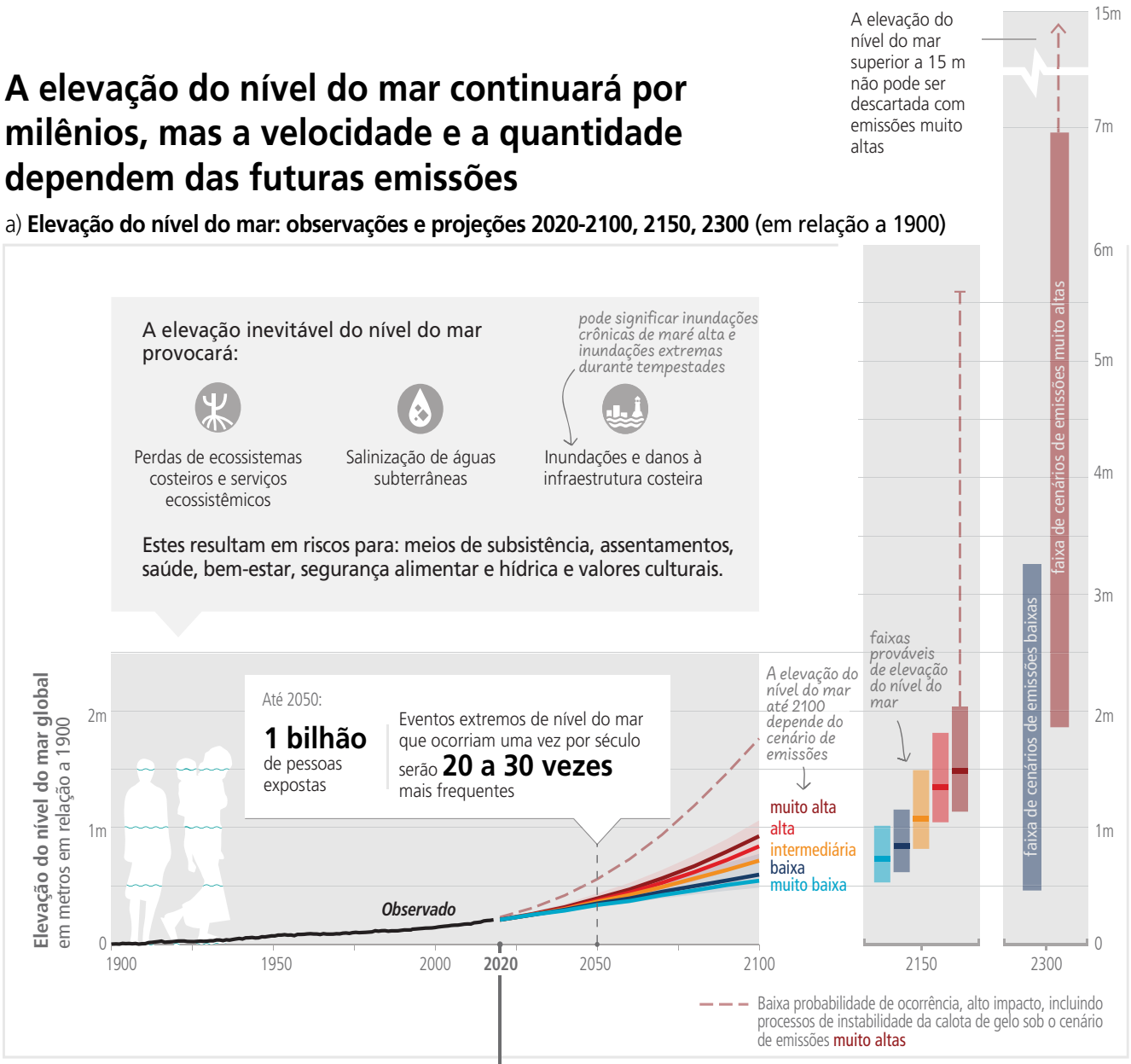
Respostas inadequadas à mudança do clima podem criar engessamentos (*lock-ins*) de vulnerabilidade, exposição e riscos que são difíceis e caros de mudar e exacerbam desigualdades existentes. Ações que se concentram em setores e riscos isoladamente e em ganhos no curto prazo muitas vezes levam à má adaptação. As opções de adaptação podem se tornar inadequadas devido a seus impactos ambientais que restringem os serviços ambientais e diminuem a biodiversidade e a resiliência dos ecossistemas à mudança do clima, ou causando resultados adversos para diferentes grupos, exacerbando a desigualdade. A má adaptação pode ser evitada através de um planejamento flexível, multissetorial, inclusivo e de longo prazo e da implementação de ações de adaptação com benefícios para muitos setores e sistemas. (*alta confiança*) {WGII SPM C.4, WGII SPM.C.4.1, WGII SPM C.4.2, WGII SPM C.4.3}

A elevação do nível do mar representa um desafio distinto e severo de adaptação, pois implica tanto em lidar com mudanças de início lento quanto com aumentos na frequência e magnitude de eventos extremos do nível do mar (*alta confiança*). Tais desafios de adaptação ocorreriam muito mais cedo sob altas taxas de elevação do nível do mar (*alta confiança*). As respostas à contínua elevação do nível do mar e subsidência da terra incluem proteção, acomodação, e relocação antecipatória e planejada (*alta confiança*). Estas respostas são mais eficazes se combinadas e/ou sequenciadas, planejadas com bastante antecedência, alinhadas com os valores socioculturais e sustentadas por processos inclusivos de engajamento comunitário (*alta confiança*). Soluções baseadas em ecossistemas como as zonas úmidas proporcionam cobenefícios para o meio ambiente e mitigação do clima, e reduzem os custos das defesas contra enchentes (*confiança média*), mas têm limites físicos locais específicos, pelo menos acima de 1,5ºC de aquecimento global (*alta confiança)* e perdem eficácia em altas taxas de elevação do nível do mar além de 0,5–1 cm/ano (*confiança média*). Os molhes podem ser mal adaptados, pois reduzem efetivamente os impactos a curto prazo, mas também podem resultar em engessamentos (*lock-ins*) e aumentar a exposição aos riscos climáticos a longo prazo, a menos que sejam integrados a um plano adaptativo no longo prazo (*alta confiança*). {WGI SPM C.2.5; WGII SPM C.2.8, WGII SPM C.4.1; WGII 13.10, WGII Caixa de Capítulo Transversal SLR; SROCC SPM B.9, SROCC SPM C.3.2, SROCC Figura SPM.4, SROCC Figura SPM.5c} (Figura 3.4)

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 98

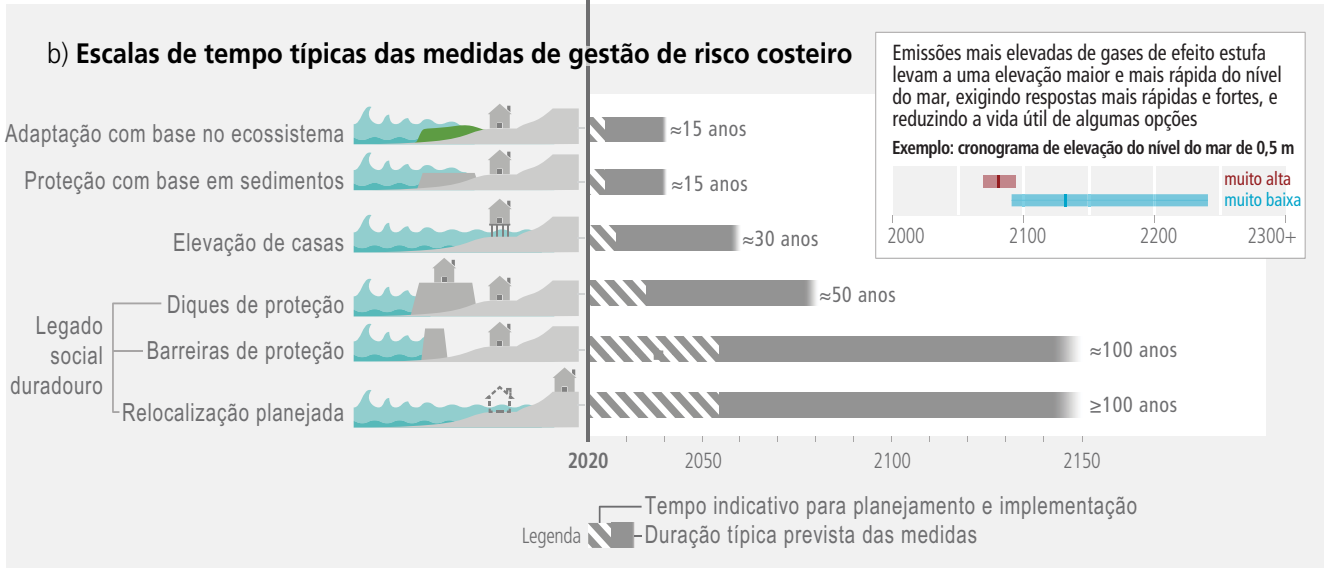
A elevação do nível do mar continuará por milênios, mas a velocidade e a quantidade dependem das futuras emissões

a) **Elevação do nível do mar: observações e projeções 2020-2100, 2150, 2300** (em relação a 1900)



A resposta à elevação do nível do mar requer planejamento a longo prazo

b) **Escalas de tempo típicas das medidas de gestão de risco costeiro**



Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 99

Figura 3.4: Mudança média global do nível do mar observada e projetada e seus impactos, e escalas de tempo da gestão de risco costeiro. Painel (a): Mudança do nível do mar média global em metros em relação a 1900. As mudanças históricas (preto) são observadas por mareógrafos antes de 1992 e altímetros depois de 1992. As mudanças futuras para 2100 e para 2150 (linhas coloridas e sombreamento) são avaliadas de forma consistente com as restrições observacionais baseadas na emulação de modelos CMIP, camadas de gelo e geleiras, e valores medianos e intervalos *prováveis* são mostrados para os cenários considerados. Em relação a 1995–2014, a *provável* elevação do nível do mar média global até 2050 está entre 0,15–0,23 m no cenário de emissões de GEE muito baixas (SSP1–1.9) e 0,20–0,29 m no cenário de emissões de GEE muito altas (SSP5–8.5); até 2100 entre 0,28–0,55 m segundo SSP1–1.9 e 0,63–1,01 m segundo SSP5–8.5; e até 2150 entre 0,37–0,86 m segundo SSP1–1.9 e 0,98–1,88 m segundo SSP5–8.5 (*confiança média*).
As mudanças relativas a 1900 são calculadas somando 0,158 m (elevação do nível do mar média global observada de 1900 a 1995–2014) às mudanças simuladas relativas a 1995–2014. As futuras mudanças para 2300 (barras) são baseadas na avaliação da bibliografia, representando a faixa de 17º–83º percentil para SSP1–2.6 (0,3–3,1 m) e SSP5–8.5 (1,7–6,8 m). Linhas tracejadas vermelhas: Baixa probabilidade, alto impacto, incluindo processos de instabilidade da camada de gelo. Elas indicam o impacto potencial de processos profundamente incertos, e mostram o 83º percentil das projeções de SSP5-8.5 que incluem processos de baixa probabilidade e alto impacto que não podem ser descartados; devido à *baixa confiança* nas projeções destes processos, isso não faz parte de uma faixa *provável*. Projeções globais e regionais para o nível do mar do AR6 do IPCC estão disponíveis em https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool. A zona costeira baixa é atualmente o lar de cerca de 896 milhões de pessoas (quase 11% da população global de 2020), projetada para atingir mais de um bilhão até 2050 em todos os cinco SSPs. **Painel (b)**: Escalas de tempo típicas para o planejamento, implementação (barras tracejadas) e vida operacional das medidas atuais de gerenciamento de risco costeiro (barras azuis). Taxas mais altas de aumento do nível do mar demandam respostas mais rápidas e mais fortes e reduzem a vida útil das medidas (inserção). Como a escala e o ritmo da elevação do nível do mar aceleram para além de 2050, os ajustes no longo prazo podem, em alguns locais, estar além dos limites das opções de adaptação atuais e, para algumas pequenas ilhas e costas baixas, podem ser um risco existencial. {WGI SPM B.5, C.2.5, Figura SPM.8, 9.6; WGII SPM B.4.5, B.5.2, C.2.8, D.3.3, TS.D.7, Caixa de Capítulo Transversal SLR} (CSB.2)

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 100

3.3 Trajetórias de Mitigação

A limitação do aquecimento global pelo homem requer emissões antropogênicas líquidas zero de CO_2. trajetórias consistentes com orçamentos de carbono de 1,5ºC implicam reduções rápidas, profundas e, na maiorias dos casos, imediatas das emissões de GEE em todos os setores (alta confiança). Exceder um nível de aquecimento e retonar (ou seja, overshoot ("ultrapassar a temperatura programada")) implicam em maiores riscos e impactos potencialmente irreversíveis, alcançar e sustenta as emissões líquidas global negativas de CO_2 reduziria o aquecimento *(alta confiança)*

3.3.1. Orçamentos de carbono remanescente

Limitar o aumento da temperatura global a um nível específico requer limitar as emissões líquidas acumuladas de CO_2 a um orçamento finito de carbono[69], juntamente com fortes reduções em outros GEE. Para cada 1000 $GtCO_2$ emitidos pela atividade humana, a temperatura média global sobe *provavelmente* 0,27ºC–0,63ºC (melhor estimativa de 0,45ºC). Esta relação implica que existe um orçamento finito de carbono que não pode ser excedido a fim de limitar o aquecimento a qualquer nível. {WGI SPM D.1, WGI SPM D.1.1; SR1.5 SPM C.1.3} (Figura 3.5)

As melhores estimativas do orçamento de carbono remanescente (RCB) do início de 2020 para limitar o aquecimento a 1,5ºC com uma probabilidade de 50%[70] é estimado em 500 $GtCO_2$; para 2ºC (67% de probabilidade) isto é 1150 $GtCO_2$.[71] Os orçamentos de carbono remanescentes foram quantificados com base no valor avaliado de resposta climática transitória às emissões líquidas acumuladas de CO_2 (TCRE) e sua incerteza, estimativas do aquecimento histórico, feedbacks do sistema climático, tais como as emissões do degelo de permafrost, e a mudança da temperatura da superfície global após as emissões globais antropogênicas de CO_2 alcançarem emissões líquidas zero, bem como as variações no aquecimento projetado em relação às emissões de gases além do CO_2 devido, em parte, à ação mitigadora. Quanto mais forte for a redução das emissões de gases que não o CO_2, menores serão as temperaturas resultantes para um determinado RCB ou maior será o RCB para o mesmo nível de mudança de temperatura. Por exemplo, o RCB para limitar o aquecimento a 1,5ºC com uma probabilidade de 50% poderia variar entre 300 a 600 $GtCO_2$ dependendo do aquecimento por gases que não o CO_2[72]. Limitar o aquecimento a 2ºC com uma probabilidade de 67% (ou 83%) implicaria um RCB de 1150 (900) $GtCO_2$ a partir do início de 2020. Para ficar abaixo de 2ºC com 50% de probabilidade, o RCB é mais alto, ou seja, 1350 $GtCO_2$[73]. {WGI SPM D.1.2, WGI Tabela SPM.2; WGIII Caixa SPM.1, WGIII Caixa 3.4; SR1.5 SPM C.1.3}

Se as emissões anuais de CO_2 entre 2020-2030 permanecessem, em média, no mesmo nível de 2019, as emissões acumuladas resultantes quase esgotariam o orçamento de carbono remanescente para 1,5ºC (50%), e esgotariam mais de um terço do orçamento de carbono remanescente para 2ºC (67%) (Figura 3.5). Com base apenas em estimativas centrais, as emissões de CO_2 líquidas acumuladas históricas entre 1850 e 2019 (2400 ±240 $GtCO_2$) totalizam cerca de quatro-quintos[74] do orçamento total de carbono para uma probabilidade de 50% de limitar o aquecimento global a 1,5ºC (estimativa central cerca de 2900 $GtCO_2$) e cerca de dois terços[75] do orçamento total de carbono para uma probabilidade de 67% de limitar o aquecimento global a 2ºC (estimativa central cerca de 3550 $GtCO_2$). {WGI Tabela SPM.2; WGIII SPM B.1.3, WGIII Tabela 2.1}

Em cenários com aumento das emissões de CO_2, projeta-se que os sumidouros de carbono da terra e do oceano sejam menos eficazes na desaceleração do acúmulo de CO_2 na atmosfera (alta confiança). Enquanto os sumidouros naturais de carbono terrestres e oceânicos são projetados para absorver, em termos absolutos, uma quantidade progressivamente maior de CO_2 sob cenários de emissões de CO_2, eles se tornam menos eficazes, ou seja, a proporção de emissões absorvidas pela terra e pelos oceanos diminui com o aumento das emissões líquidas acumuladas de CO_2 (*alta confiança*). Respostas adicionais dos ecossistemas ao aquecimento ainda não totalmente incluídas nos modelos climáticos, tais como fluxos de GEE de zonas úmidas, degelo do permafrost e incêndios, aumentariam ainda mais as concentrações desses gases na atmosfera *(alta confiança*). Em cenários onde as concentrações de CO_2 atingem o pico e diminuem durante o século 21, a terra e o oceano começam a absorver menos carbono em resposta ao declínio das concentrações atmosféricas de CO_2 (*alta confiança*) e se transformam em uma fonte líquida fraca até 2100 no cenário de emissões de GEE muito baixas (*confiança média*)[76]. {WGI SPM

[69] Consulte o Anexo I: Glossário.

[69] Consulte o Anexo I: Glossário.

[70] Esta probabilidade se baseia na incerteza da resposta climática transitória às emissões líquidas acumuladas de CO_2 (TCRE) e às reações adicionais do sistema terrestre e fornece a probabilidade de que o aquecimento global não excederá os níveis de temperatura especificados. {WGI Tabela SPM.1}

[71] Bancos de dados globais fazem escolhas diferentes sobre quais emissões e remoções que ocorrem na terra são consideradas antropogênicas. A maioria dos países relatam em seus Inventários Nacionais de GEE seus fluxos antropogênicos de CO_2 terrestres, incluindo os fluxos devidos a mudanças ambientais causadas pelo ser humano (por exemplo, fertilização de CO_2) em terras "gerenciadas". Usando estimativas de emissões baseadas nesses inventários, os orçamentos de carbono remanescentes devem ser reduzidos de forma correspondente. {WGIII SPM Nota 9, WGIII TS.3, WGIII Caixa de Capítulo Transversal 6}

[72] O principal cenário de RCB pressupõe um aquecimento futuro de gases que não sejam de - "além de" entende-se que CO_2 estaria incluso (a contribuição adicional líquida de aerossóis e GEE que não CO_2) de cerca de 0,1ºC acima de 2010-2019, de acordo com cenários de mitigação rigorosos. Se o aquecimento adicional de gases que não o CO_2 for maior, o RCB para limitar o aquecimento a 1,5ºC com 50% de probabilidade diminui para cerca de 300 $GtCO_2$. Se, no entanto, o aquecimento adicional por gases que não o CO_2 for limitado a apenas 0,05ºC (por meio de reduções mais fortes de CH_4 e N_2O por meio de uma combinação de mudanças estruturais e comportamentais profundas, por exemplo, mudanças na dieta), o RCB poderia ser de cerca de 600 $GtCO_2$ para um aquecimento de 1,5ºC. {WGI Tabela SPM.2, WGI Caixa TS.7; WGIII Caixa 3.4}

[73] Quando há ajuste para emissões desde os relatórios anteriores, estas estimativas de RCB são semelhantes ao SR1.5, mas maiores que os valores do AR5 devido a melhorias metodológicas. {WGI SPM D.1.3}

[74] As incertezas para os orçamentos totais de carbono não foram avaliadas e podem afetar as frações específicas calculadas.

[75] Consulte a nota de rodapé 74.

[76] Esses ajustes projetados dos sumidouros de carbono para estabilizar ou diminuir as concentrações atmosféricas de CO_2 são contabilizados nos cálculos dos orçamentos de carbono remanescentes. {WGI SPM nota de rodapé 32}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 101

B.4, WGI SPM B.4.1, WGI SPM B.4.2, WGI SPM B.4.3}

Os orçamentos de carbono remanescente para limitar o aquecimento a 1,5°C poderiam ser esgotados em breve, e os de 2°C em grande parte exauridos

Os orçamentos de carbono remanescentes são semelhantes às emissões do uso da infraestrutura existente e planejada de combustíveis fósseis, sem redução adicional

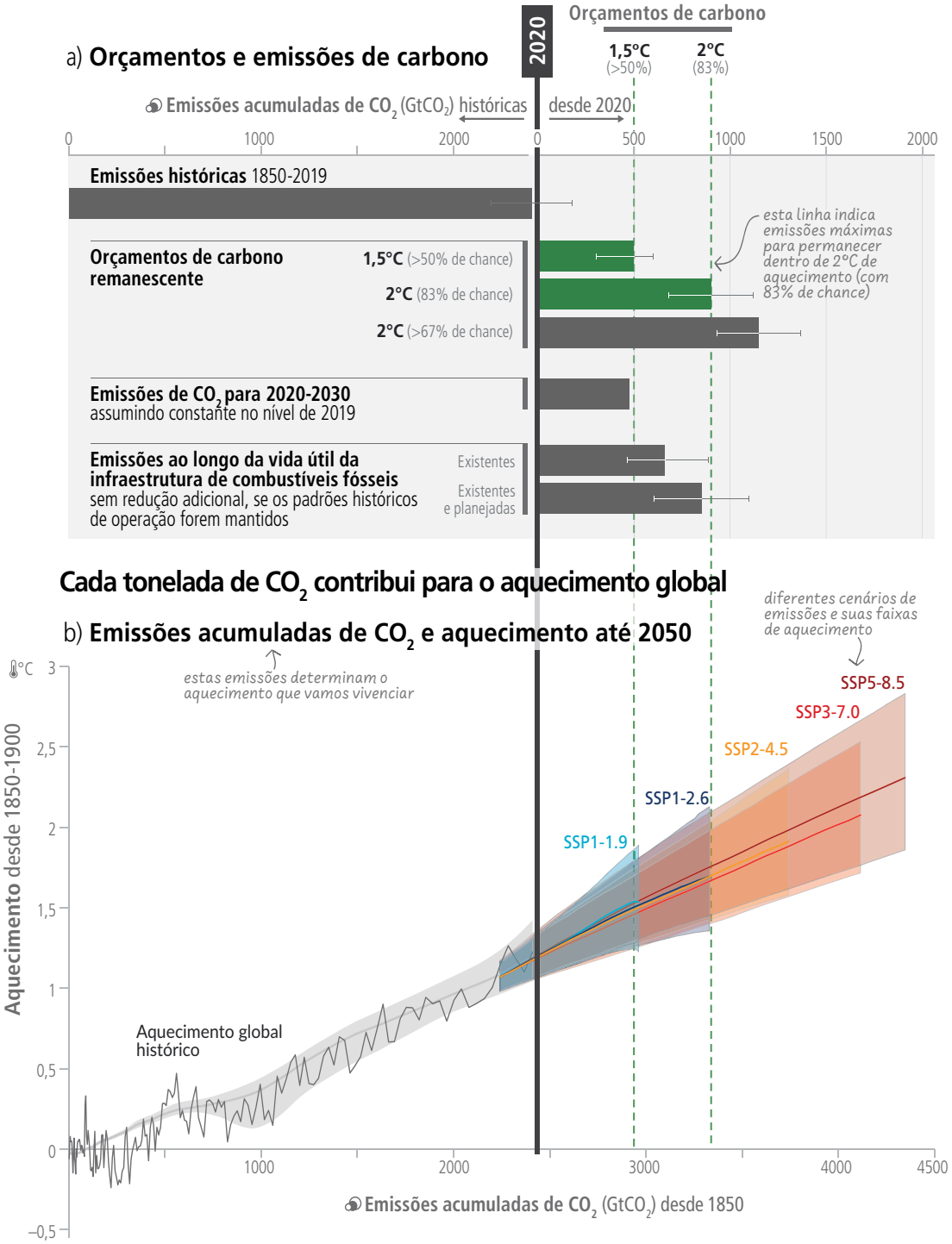


Figura 3.5: Emissões acumuladas no passado, projetadas e comprometidas, e mudanças de temperatura global associadas. Painel (a) Orçamentos de carbono remanescentes avaliados para limitar o aquecimento *a 1,5°C mais provável do que improvável, abaixo de 2°C com 83% e 67% de probabilidade, em comparação com as emissões cumulativas correspondentes às emissões constantes de 2019 até 2030, infraestruturas de combustíveis fósseis existentes e planejadas (em GtCO$_2$)*. Para os orçamentos de carbono remanescentes, linhas finas indicam a incerteza devido à contribuição do aquecimento por gases que não o CO$_2$. Para as emissões ao longo da vida útil da infraestrutura de combustíveis fósseis, as linhas finas indicam a faixa de sensibilidade avaliada. **Painel (b)** Relação entre as emissões acumuladas de CO$_2$ e o aumento da temperatura da superfície global. Dados históricos (linha preta fina) mostram emissões históricas de CO$_2$ *versus* o aumento observado da temperatura da superfície global em relação ao período 1850–1900. A faixa cinza com sua linha central mostra uma estimativa correspondente da participação do aquecimento histórico causada pelo ser humano. As áreas coloridas mostram a faixa *muito provável* avaliada das projeções de temperatura da superfície global, e as linhas centrais coloridas espessas mostram a estimativa mediana em função das emissões acumuladas de CO$_2$ para os cenários selecionados no SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, e SSP5-8.5. As projeções até 2050 utilizam as emissões acumuladas de CO$_2$ de cada cenário respectivo, e o aquecimento global projetado inclui a contribuição de todas as forçantes antropogênicas. {WGI SPM D.1, WGI Figura SPM.10, WGI Tabela SPM.2; WGIII SPM B.1, WGIII SPM B.7, WGIII 2.7; SR1.5 SPM C.1.3}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 102

Tabela 3.1: Características principais das trajetórias de emissões globais modeladas. Resumo das emissões de CO_2 e GEE projetadas, cronogramas de emissões líquidas zero projetadas e os resultados do aquecimento global. As trajetórias são categorizadas (colunas), de acordo com sua probabilidade de limitar o aquecimento a diferentes níveis de pico de aquecimento (se o pico de temperatura ocorrer antes de 2100) e níveis de aquecimento de 2100. Os valores mostrados são para as médias [p50] e os 5º–95º percentis [p5–p95], observando que nem todas as trajetórias alcançam emissões líquidas zero de CO_2 ou GEE. {WGIII Tabela SPM.2}

			C1 [97]	C1a [50]	C1b [47]	C2 [133]	C3 [311]	C3a [204]	C3b [97]	C4 [159]	C5 [212]	C6 [97]
p50 [p5-p95] (1)	Categoria (2) [nº das trajetórias]	Trajetórias de emissões globais modeladas categorizadas por níveis projetados de aquecimento global (GWL). As definições detalhadas de probabilidade são fornecidas na Caixa 1 SPM. Os cinco cenários ilustrativos (SSPx-yy) considerados pelo WGI do AR6 e as Trajetórias Ilustrativas (Mitigação) avaliados no WGIII estão alinhados com as categorias de temperatura e são indicados em uma coluna separada. As trajetórias de emissões globais contêm informações diferenciadas regionalmente. Esta avaliação se concentra em suas caracteristi-cas globais.	limitar o aquecimento a 1,5°C (>50%), sem ou com ultrapas-sagem limitada	com emissões líquidas zero de GEE	sem emissões líquidas zero de GEE	retornar o aquecimento a 1,5°C (>50%) após uma alta ultrapassagem	limitar o aquecimen-to a 2°C (>67%)	com ações a partir de 2020	NDCs até 2030	limitar o aquecimen-to a 2°C (>50%)	limitar o aquecimen-to a 2,5°C (>50%)	limitar o aquecimen-to a 3°C (>50%)
	Categoria/ classificação de subcategoria											
Redução das emissões de GEE a partir de 2019 (%) (3)	2030	Redução de emissões de GEE medianas projetadas no ano em todos os cenários em comparação com o modelo de 2019, com o 5º-95º percentil entre parênteses. Números negativos indicam aumento nas emissões em relação a 2019	43 [34-60]	41 [31-59]	48 [35-61]	23 [0-44]	21 [1-42]	27 [13-45]	5 [0-14]	10 [0-27]	6 [-1 a 18]	2 [-10 a 11]
	2040		69 [58-90]	66 [58-89]	70 [62-87]	55 [40-71]	46 [34-63]	47 [35-63]	46 [34-63]	31 [20-5]	18 [4-33]	3 [-14 a 14]
	2050		84 [73-98]	85 [72-100]	84 [76-93]	75 [62-91]	64 [53-77]	63 [52-76]	68 [56-83]	49 [35-65]	29 [11-48]	5 [-2 a 18]
Marcos de emissões (4)	Emissões de CO_2 líquidas zero (% de trajetórias para as emissões líquidas zero)	Intervalos médios de 5 anos nos quais as emissões projetadas de CO_2 e GEE das trajetórias nesta categoria atingem emissões líquidas zero, com o intervalo do 5º ao 95º percentil entre colchetes. A porcentagem de trajetórias para emissões líquidas zero é indicada em parênteses. Três pontos (...) denota emissões líquidas zero não alcançadas para esse percentual.	2050-2055 (100%) [2035-2070]			2055-2060 (100%) [2045-2070]	2070-2075 (93%) [2055-...]	2070-2075 (91%) [2055-...]	2065-2070 (97%) [2055-2090]	2080-2085 (86%) [2065-...]	...-... (41%) [2080-...]	sem emissões líquidas zero
	emissões líquidas zero de GEE (5) (% de trajetórias para emissões líquidas zero		2095-2100 (52%) [2050-...]	2070-2075 (100%) [2050-2090]	...-... (0%) [...-...]	2070-2075 (87%) [2055-...]	...-... (30%) [2075-...]	...-... (24%) [2080-...]	...-... (41%) [2075-...]	...-... (31%) [2075-...]	...-... (12%) [2090-...]	sem emissões líquidas zero
Emissões líquidas de CO_2 acumuladas [Gt CO_2] (6)	2020 para emissões líquidas zero de CO_2	Emissões de CO_2 líquidas acumuladas médias nos cenários projetados nesta categoria até chegar a emissões líquidas zero ou até 2100, com o 5º-95º intervalo de percentil entre colchetes.	510 [330-710]	550 [340-760]	460 [320-590]	720 [530-930]	890 [640-1160]	860 [640-1180]	910 [720-1150]	1210 [970-1490]	1780 [1400-2360]	sem emissões líquidas zero
	2020 2100		320 [-210-570]	160 [-220-620]	360 [10-540]	400 [-90-620]	800 [510-1140]	790 [480-1150]	800 [560-1050]	1160 [700-1490]	1780 [1260-2360]	2790 [2440-3520]
Mudanças de temperatura média global 50% de probabilidade (°C)	no pico do aquecimen-to	Mudança de temperatura projetada das trajetórias nesta categoria (50% de probabilidade em toda a gama de incertezas climáticas), em relação a 1850-1900, no pico de aquecimento e em 2100, para o valor mediano em todos os cenários e o intervalo do 5º-95º percentil entre colchetes.	1,6 [1,4-1,6]	1.6 [1,4-1,6]	1.6 [1,5-1,6]	1.7 [1,5-1,8]	1.7 [1,6-1,8]	1.7 [1,6-1,8]	1.8 [1,6-1,8]	1.9 [1,7-2,0]	2,2 [1,9-2,5]	sem pico até 2100
	2100		1.3 [1,1-1,5]	1.2 [1,1-1,4]	1.4 [1,3-1,5]	1.4 [1,2-1,5]	1.6 [1,5-1,8]	1.6 [1,5-1,8]	1.6 [1,5-1,7]	1.8 [1,5-2,0]	2,1 [1,9-2,5]	2,7 [2,4-2,9]
Probabilidade de o pico de aquecimento global permanecer abaixo de (%)	<1,5°C	Probabilidade média de que as trajetórias projetados nesta categoria permaneçam abaixo de um determinado nível de aquecimento global, com o intervalo do 5º-95º percentil entre colchetes.	38 [33-58]	38 [34-60]	37 [33-56]	24 [15-42]	20 [13-41]	21 [14-42]	17 [12-35]	11 [7-22]	4 [0-10]	0 [0-0]
	<2,0°C		90 [86-97]	90 [85-97]	89 [87-96]	82 [71-93]	76 [68-91]	78 [69-91]	73 [67-87]	59 [50-77]	37 [18-59]	8 [2-18]
	<3,0°C		100 [99-100]	100 [99-100]	100 [99-100]	100 [99-100]	99 [98-100]	100 [98-100]	99 [98-99]	98 [95-99]	91 [83-98]	71 [53-88]

1 Explicações detalhadas sobre a Tabela são fornecidas em WGIII Caixa SPM.1 e WGIII Tabela SPM.2. A relação entre as categorias de temperatura e SSP/RCPs é discutida na Caixa de Seção Transversal 2. Os valores na tabela referem-se aos 50º e [5º–95º] percentis através das trajetórias que se enquadram em uma determinada categoria, conforme definido no WGIII Caixa SPM.1. O sinal dos três pontos (...) indica que o valor não pode ser dado (pois o valor é posterior a 2100 ou, para emissões líquidas zero, não é atingido o valor de emissões líquidas zero). Com base na avaliação dos emuladores climáticos no WGI do AR6 (Capítulo 7, Caixa 7.1), dois emuladores climáticos foram usados para a avaliação probabilística do aquecimento resultante das trajetórias. Para as colunas "Mudança de Temperatura" e "Probabilidade", os valores sem colchetes representam o 50º percentual através das trajetórias nessa categoria e a mediana [50º percentil] através das estimativas de aquecimento do emulador do modelo climático probabilístico MAGICC. Para as faixas entre parênteses na coluna "probabilidade", o aquecimento médio para cada trajetória nessa categoria é calculado para cada um dos dois emuladores do modelo climático (MAGICC e FaIR). Estas faixas cobrem tanto a incerteza das trajetórias das emissões quanto a incerteza dos emuladores climáticos. Todos os níveis de aquecimento global são relativos a 1850–1900.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 103

2 As trajetórias C3 são subcategorizadas de acordo com o cronograma de ação política para corresponder as trajetórias de emissões em WGIII Figura SPM.4.
3 As reduções de emissões globais das trajetórias de mitigação são relatadas em uma base trajetória-a-trajetória em relação às emissões globais modeladas harmonizadas em 2019 em vez das emissões globais relatadas em WGIII SPM Seção B e WGIII Capítulo 2; isso assegura consistência interna nas suposições sobre fontes e atividades de emissão, assim como consistência com projeções de temperatura baseadas na avaliação da ciência climática física pelo WGI (consulte WGIII SPM Nota de Rodapé 49). Os valores negativos (por exemplo, em C5, C6) representam um aumento nas emissões. As emissões de GEE modeladas em 2019 são de 55 [53–58] $GtCO_2e$, portanto dentro das faixas de incerteza das estimativas para as emissões de 2019 [53–66] $GtCO_2e$ (consulte 2.1.1).
4 Os marcos de emissão são fornecidos para intervalos de 5 anos, a fim de serem consistentes com os dados subjacentes da etapa temporal de 5 anos das trajetórias modeladas. Os intervalos entre colchetes abaixo se referem ao intervalo entre as trajetórias, compreendendo o limite inferior do intervalo de 5 anos do 5º percentual e o limite superior do intervalo de 5 anos do 95º percentual. Números entre colchetes significam a fração de trajetórias que atingem marcos específicos ao longo do século 21. Os percentuais relatados em todas as trajetórias dessa categoria incluem aqueles que não atingem emissões líquidas zero antes de 2100.
5 Nos casos em que os modelos não relatam todos os GEE, as espécies de GEE em falta são preenchidas e agregadas em um pacote de emissões de GEE em CO_2e de Quioto definido pelo potencial de aquecimento global de 100 anos. Para cada trajetória, o reporte das emissões de CO_2, CH_4 e N_2O foi o mínimo exigido para a avaliação da resposta climática e a atribuição a uma categoria climática. As trajetórias de emissões sem avaliação climática não estão incluídas nas faixas aqui apresentadas. Consulte WGIII Anexo III.II.5.
6 As emissões acumuladas são calculadas desde o início de 2020 até o momento de emissões líquidas zero e 2100, respectivamente. Elas são baseadas em emissões líquidas de CO_2 harmonizadas, garantindo a consistência com a avaliação do WGI do orçamento de carbono remanescente. {WGIII Caixa 3.4, WGIII SPM Nota de Rodapé 50}

3.3.2. Emissões Líquidas Zero: Cronogramas e Implicações

De uma perspectiva da ciência física, limitar o aquecimento global causado pelo ser humano a um nível específico requer limitar as emissões acumuladas de CO_2, alcançando emissões líquidas zero ou emissões líquidas negativas de CO_2, juntamente com fortes reduções em outras emissões de GEE (consulte a Caixa de Seção Transversal 1). As trajetórias modeladas globais que alcançam e sustentam emissões de GEE líquidas zero são projetadas para resultar em um declínio gradual na temperatura da superfície (*alta confiança*). Atingir emissões de GEE líquidas zero requer principalmente reduções profundas de CO_2, metano e outras emissões de GEE, e implica em emissões líquidas negativas de CO_2[77]. A remoção do dióxido de carbono (CDR) será necessária para atingir as emissões líquidas negativas de CO_2[78]. Atingir emissões de CO_2 líquidas zero globais, com o restante das emissões antropogênicas de CO_2 compensadas pelo CO_2 armazenado de forma durável da remoção antropogênica, é uma exigência para estabilizar o aumento da temperatura da superfície global induzida pelo CO_2 (consulte 3.3.3) (*alta confiança*). Isso é diferente de alcançar emissões de GEE líquidas zero, onde as emissões antropogênicas de GEE ponderadas (consulte a Caixa de Seção Transversal 1) são iguais à remoção de CO_2 (*alta confiança*). As trajetórias de emissões que atingem e sustentam emissões de GEE líquidas zero definidas pelo potencial de aquecimento global de 100 anos implicam emissões de CO_2 líquidas negativas e são projetadas para resultar em um declínio gradual na temperatura da superfície após um pico anterior (*alta confiança*). Enquanto que atingir emissões de CO_2 líquidas zero ou emissões de GEE líquidas zero exige reduções profundas e rápidas nas emissões brutas, a implantação da CDR para contrabalançar as emissões residuais difíceis de diminuir (por exemplo, algumas emissões da agricultura, aviação, navegação e processos industriais) é inevitável (*alta confiança*). {WGI SPM D.1, WGI SPM D.1.1, WGI SPM D.1.8; WGIII SPM C.2, WGIII SPM C.3, WGIII SPM C.11, WGIII Caixa TS.6; SR1.5 SPM A.2.2}

Em trajetórias modeladas, o cronograma em que as emissões de CO_2 atingem o valor líquido zero, seguido por emissões líquidas zero de GEE, depende de diversas variáveis, incluindo o resultado climático desejado, a estratégia de mitigação e os gases abrangidos (alta confiança). As emissões de CO_2 líquidas zero globais são atingidas no início da década de 2050 em trajetórias que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) com ou sem *overshoot* limitado ("sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada"), e por volta do início da década de 2070 em trajetórias que limitam o aquecimento a 2ºC (>67%). Enquanto as emissões de GEE sem CO_2 são fortemente reduzidas em todas as trajetórias que limitam o aquecimento a 2ºC (>67%) ou menos, as emissões residuais de CH_4 e N_2O e Gases fluorados de cerca de 8 [5–11] $GtCO_2e$/ano permanecem no momento de emissões líquidas zero de GEE, contrabalançadas pelas emissões de CO_2 líquidas negativas. Como resultado, o valor de emissões de CO_2 líquidas zero seria atingido antes do valor de emissões de GEE líquidas zero (*alta confiança*). {WGIII SPM C.2, WGIII SPM C.2.3, WGIII SPM C.2.4, WGIII Tabela SPM.2, WGIII 3.3} (Figura 3.6)

[77] Emissões de GEE líquidas zero definidas pelo potencial de aquecimento global de 100 anos. Consulte a nota de rodapé 12.

[78] Consulte a seção 3.3.3 e 3.4.1

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 104

Trajetórias modeladas globais que limitam o aquecimento a 1,5°C (>50%) sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada atingem emissões líquidas zero de CO_2 por volta de 2050

O total de **gases de efeito estufa (GEE)** atinge o valor líquido zero mais tarde

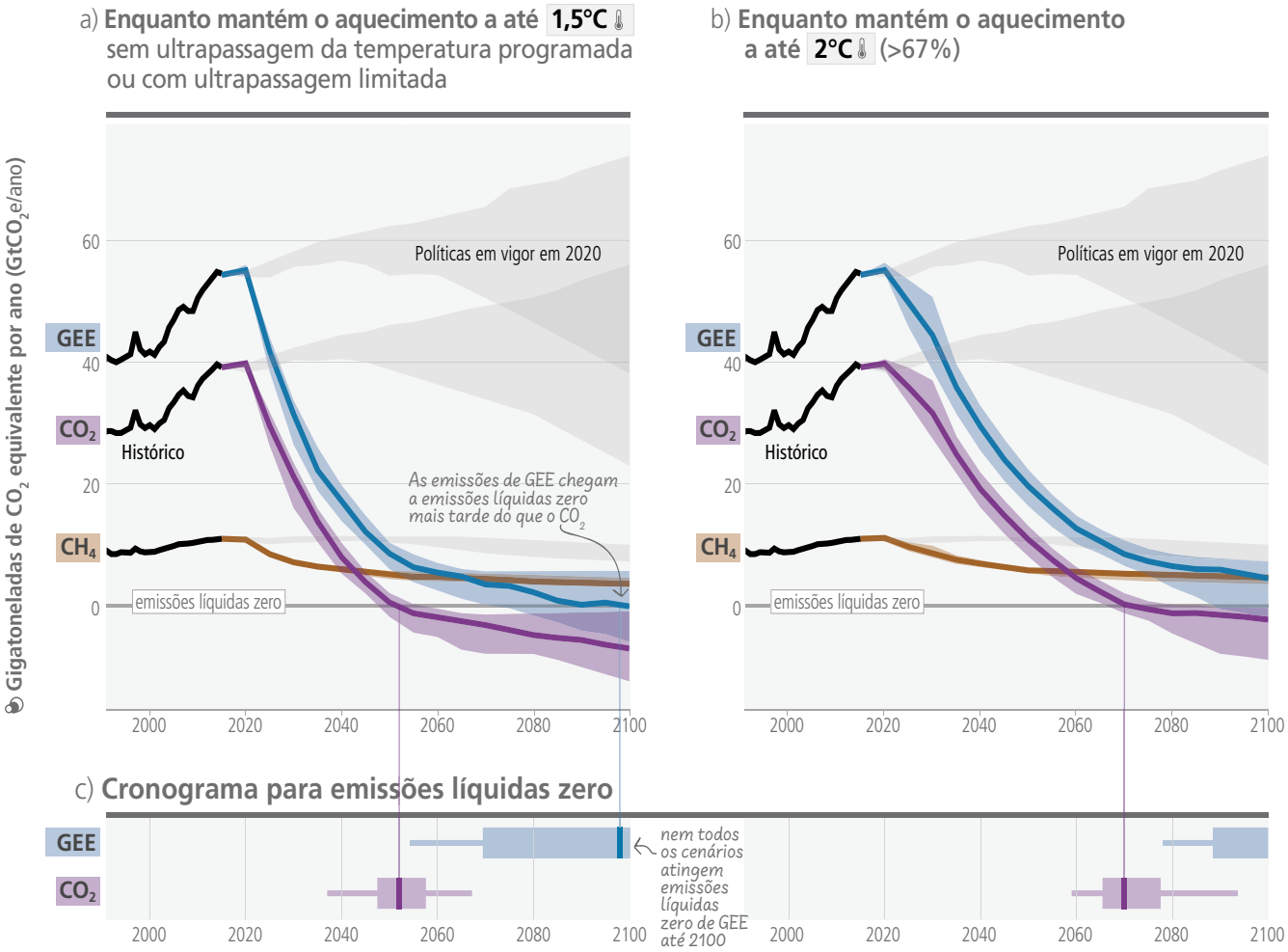


Figura 3.6: Total de emissões de GEE, CO_2 e CH_4 e cronograma para atingir as emissões líquidas zero em diferentes trajetórias de mitigação. Fileira superior: Emissões de GEE, CO_2 e CH_4 ao longo do tempo (em $GtCO_2e$) com emissões históricas, emissões projetadas de acordo com as políticas implementadas até o final de 2020 (cinza) e trajetórias consistentes com as metas de temperatura em cores (azul, roxo e marrom, respectivamente); o **Painel (a) (esquerda)** mostra trajetórias que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) com ou sem *overshoot* limitado ("sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada") (C1) e o **Painel (b) (direita)** mostra trajetórias que limitam o aquecimento a 2ºC (>66%) (C3). **Fileira inferior**: O **Painel (c)** mostra o cronograma mediano (linha vertical), provável (barra) e muito provável (linhas finas) para atingir emissões líquidas zero de GEE e CO_2 para trajetórias modeladas globais que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) com ou sem *overshoot* limitado ("sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada") (C1) (esquerda) ou 2ºC (>67%) (C3) (direita). {WGIII Figura SPM.5}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 105

3.3.3. Contribuições Setoriais para a Mitigação

Todas as trajetórias modeladas globais que limitam o aquecimento a 2ºC (>67%) ou inferior até 2100 envolvem reduções rápidas e profundas e, na maioria dos casos, imediatas das emissões de GEE em todos os setores (consulte também 4.1, 4.5). Reduções nas emissões de GEE na indústria, transporte, edifícios e áreas urbanas podem ser alcançadas através de uma combinação de eficiência e conservação de energia e uma transição para tecnologias com baixo teor de GEE e portadores de energia (consulte também 4.5, Figura 4.4). As opções socioculturais e as mudanças comportamentais podem reduzir as emissões globais de GEE dos setores de uso final, com a maior parte do potencial dos países desenvolvidos, se combinadas com um melhor projeto e acesso à infraestrutura. (*alta confiança*) {WGIII SPM C.3, WGIII SPM C.5, WGIII SPM C.6, WGIII SPM C.7.3, WGIII SPM C.8, WGIII SPM C.10.2}

As trajetórias de mitigação modeladas globais que atingem emissões líquidas zero de CO_2 e GEE incluem a transição de combustíveis fósseis sem captura e armazenamento de carbono (CCS) para fontes de energia de muito baixo ou zero carbono, tais como energias renováveis ou combustíveis fósseis com CCS, medidas voltadas para a demanda e melhoria da eficiência, reduzindo as emissões de GEE que não o CO_2, e remoção do dióxido de carbono (CDR).[79] Em trajetórias modeladas globais que limitam o aquecimento a 2ºC ou abaixo, quase toda a eletricidade é fornecida a partir de fontes com zero ou baixo teor de carbono em 2050, como renováveis ou combustíveis fósseis com captura e armazenamento de CO_2, combinadas com o aumento da eletrificação da demanda energética. Tais trajetórias atendem à demanda de serviços de energia com uso relativamente baixo de energia, por exemplo, através de maior eficiência energética e mudanças comportamentais e aumento da eletrificação do uso final de energia. Trajetórias globais modeladas limitando o aquecimento global a 1,5ºC (>50%) com ou sem *overshoot* limitado ("sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada") geralmente implementam tais mudanças mais rapidamente do que trajetórias que limitam o aquecimento global a 2ºC (>67%). (*alta confiança*) {WGIII SPM C.3, WGIII SPM C.3.2, WGIII SPM C.4, WGIII TS.4.2; SR1.5 SPM C.2.2}

As **opções de mitigação de AFOLU, quando implementadas de forma sustentável, podem proporcionar reduções de emissões de GEE em larga escala e maior remoção de CO_2; entretanto, barreiras à implementação e *trade-offs* podem resultar dos impactos da mudança do clima, das demandas concorrentes sobre a terra, dos conflitos com a segurança alimentar e a subsistência, da complexidade dos sistemas de propriedade e gestão da terra e dos aspectos culturais (consulte 3.4.1).** Todas as trajetórias modeladas avaliadas que limitam o aquecimento a 2ºC (>67%) ou menos até 2100 incluem a mitigação baseada em energia e mudança no uso da terra, com a maioria incluindo diferentes combinações de reflorestamento, florestamento, desmatamento reduzido e bioenergia. Entretanto, o carbono acumulado na vegetação e nos solos está em risco de perda futura (ou reversão de sumidouros) desencadeada pela mudança do clima e por distúrbios tais como inundações, secas, incêndios ou surtos de pragas, ou por uma futura má gestão. (*alta confiança*) {WGI SPM B.4.3; WGII SPM B.2.3, WGII SPM B.5.4; WGIII SPM C.9, WGIII SPM C.11.3, WGIII SPM D.2.3, WGIII TS.4.2, 3.4; SR1.5 SPM C.2.5; SRCCL SPM B.1.4, SRCCL SPM B.3, SRCCL SPM B.7}

Além das reduções de emissões profundas, rápidas e sustentadas, a CDR pode cumprir três funções complementares: reduzir as emissões líquidas de CO_2 ou de GEE no curto prazo; contrabalançar as emissões residuais "difíceis de eliminar" (por exemplo, algumas emissões da agricultura, aviação, transporte marítimo, processos industriais) para ajudar a alcançar emissões líquidas zero de CO_2 ou de GEE e alcançar emissões líquidas negativas de CO_2 ou de GEE se implantadas em níveis que excedam as emissões residuais anuais (*alta confiança*). Os métodos de CDR variam em termos de maturidade, processo de remoção, escala de tempo de armazenamento de carbono, meio de armazenamento, potencial de mitigação, custo, benefícios, impactos e riscos, e requisitos de governança (*alta confiança*). Especificamente, a maturidade varia de menor maturidade (por exemplo, alcalinização oceânica) a maior maturidade (por exemplo, reflorestamento); o potencial de remoção e armazenamento varia de menor potencial (<1 Gt CO_2/ano, por exemplo, gerenciamento de carbono azul) a maior potencial (>3 Gt CO_2/ano, por exemplo agroflorestais); os custos variam de custo mais baixo (por exemplo, –45 a 100 US$/t$CO_2$ para sequestro de carbono no solo) a custo mais alto (por exemplo, 100–300 US$/t$CO_2$ para captura e armazenamento direto de dióxido de carbono no ar) (*confiança média*). Os prazos estimados de armazenamento variam de décadas a séculos para métodos que armazenam carbono na vegetação e através do manejo do carbono do solo, a dez mil anos ou mais para métodos que armazenam carbono em formações geológicas (*alta confiança*). Florestamento, reflorestamento, melhoria do manejo florestal, agroflorestamento e sequestro de carbono no solo são atualmente os únicos métodos amplamente praticados de CDR (*alta confiança*). Os métodos e níveis de implantação da CDR em trajetórias de mitigação modeladas globalmente variam dependendo das suposições sobre custos, disponibilidade e restrições (*alta confiança*). {WGIII SPM C.3.5, WGIII SPM C.11.1, WGIII SPM C.11.4}

[79] A CCS é uma opção para reduzir as emissões provenientes de fontes de energia fóssil em larga escala e de fontes industriais, desde que haja armazenamento geológico disponível. Quando o CO_2 é capturado diretamente da atmosfera (DACCS), ou da biomassa (BECCS), a CCS fornece o componente de armazenamento destes métodos de CDR. A captura de CO_2 e a injeção de subsuperfície é uma tecnologia madura para o processamento de gás e a melhoria da recuperação de petróleo. Ao contrário do setor de petróleo e gás, a CCS é menos madura no setor de energia, bem como na produção de cimento e produtos químicos, onde é uma opção crítica de mitigação. Estima-se que a capacidade técnica de armazenamento geológico seja da ordem de 1000 GtCO_2, o que é mais do que as necessidades de armazenamento de CO_2 até 2100 para limitar o aquecimento global a 1,5ºC, embora a disponibilidade regional de armazenamento geológico possa ser um fator limitante. Se o local de armazenamento geológico for adequadamente selecionado e gerenciado, estima-se que o CO_2 possa ser permanentemente isolado da atmosfera. A implementação da CCS enfrenta atualmente barreiras tecnológicas, econômicas, institucionais, ecológicas, ambientais e socioculturais. Atualmente, as taxas globais de implantação da CCS estão muito abaixo daquelas das trajetórias modelo, limitando o aquecimento global a 1,5ºC a 2ºC. Condições favoráveis, tais como instrumentos políticos, maior apoio público e inovação tecnológica poderiam reduzir essas barreiras. *(alta confiança)* {WGIII SPM C.4.6}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 106

3.3.4. Trajetórias sendo Ultrapassadas: Aumento dos Riscos e Outras Implicações

Exceder um orçamento específico de carbono remanescente resulta em um aquecimento global maior. Atingir e manter as emissões globais líquidas negativas de CO_2 poderia reverter a superação da temperatura resultante (*alta confiança*). Reduções contínuas nas emissões de forçantes climáticos de vida curta, particularmente o metano, após o pico da temperatura, também reduziriam ainda mais o aquecimento (*alta confiança*). Apenas um pequeno número das trajetórias mais ambiciosas modeladas globalmente limita o aquecimento global a 1,5ºC (>50%) sem *overshoot* ("sem ultrapassagem da temperatura programada"). {WGI SPM D.1.1, WGI SPM D.1.6, WGI SPM D.1.7; WGIII TS.4.2}

O *overshoot* ("ultrapassagem da temperatura programada") de um nível de aquecimento resulta em impactos mais adversos, alguns irreversíveis e riscos adicionais para os sistemas humanos e naturais em comparação com a permanência abaixo desse nível de aquecimento, com riscos crescentes com a magnitude e duração do *overshoot* (*alta confiança*). Em comparação com as trajetórias sem *overshoot*, as sociedades e os ecossistemas estariam expostos a mudanças maiores e mais generalizadas nos condutores de impacto climático, tais como calor extremo e precipitação extrema, com riscos crescentes para a infraestrutura, assentamentos costeiros baixos e meios de subsistência associados (*alta confiança*). Ultrapassar (*overshooting*) 1,5ºC resultará em impactos adversos irreversíveis em certos ecossistemas de baixa resiliência, tais como ecossistemas polares, de montanha e costeiros, impactados pelo derretimento das geleiras, ou pela aceleração e aumento do nível do mar (*alta confiança*). O *overshoot* aumenta os riscos de impactos graves, como o aumento de incêndios, mortalidade em massa de árvores, seca de turfeiras, descongelamento do permafrost e enfraquecimento dos sumidouros naturais de carbono; tais impactos poderiam aumentar a liberação de GEE tornando a inversão de temperatura mais desafiadora (*confiança média*). {WGI SPM C.2, WGI SPM C.2.1, WGI SPM C.2.3; WGII SPM B.6, WGII SPM B.6.1, WGII SPM B.6.2; SR1.5 3.6}

Quanto maior o *overshoot*, mais emissões líquidas negativas de CO_2 são necessárias para retornar a um determinado nível de aquecimento (*alta confiança*). A redução da temperatura global pela remoção do CO_2 exigiria emissões líquidas negativas de 220 $GtCO_2$ (melhor estimativa, com uma faixa *provável* de 160-370 $GtCO_2$) para cada décimo de grau (*confiança média*). Trajetórias modeladas que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) com ou sem *overshoot* limitado ("sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada") atingem valores medianos de emissões líquidas negativas acumuladas de 220 $GtCO_2$ até 2100, trajetórias que retornam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) após um alto *overshoot* ("uma alta ultrapassagem da temperatura programada") atingem valores medianos de 360 $GtCO_2$ (*alta confiança*).[80] Redução mais rápida das emissões de CO_2 e gases que não o CO_2, especialmente metano, limita os picos de aquecimento e reduz a exigência de emissões líquidas negativas de CO_2 e CDR, reduzindo assim as preocupações de viabilidade e sustentabilidade e os riscos sociais e ambientais (*alta confiança*). {WGI SPM D.1.1; WGIII SPM B.6.4, WGIII SPM C.2, WGIII SPM C.2.2, WGIII Tabela SPM.2}

3.4 Interações no Longo Prazo entre Adaptação, Mitigação e Desenvolvimento Sustentável

A mitigação e a adaptação podem levar a sinergias e trade-offs com desenvolvimento sustentável (alta confiança). A mitigação e adaptação acelerada e equitativa trazem benefícios ao evitar os danos da mudança do clima e são fundamentais para alcançar o desenvolvimento sustentável (alta confiança). As trajetórias de desenvolvimento resilientes ao clima[81] são progressivamente limitadas por cada incremento de aquecimento adicional (confiança muito alta). Há uma janela de oportunidade que se fecha rapidamente para assegurar um futuro viável e sustentável para todos *(confiança muito alta).*

3.4.1. Sinergias e trade-offs, custos e benefícios

As opções de mitigação e adaptação podem levar a sinergias e *trade-offs* com outros aspectos do desenvolvimento sustentável (consulte também Seção 4.6, Figura 4.4). Sinergias e *trade-offs* dependem do ritmo e da magnitude das mudanças e do contexto de desenvolvimento, incluindo as desigualdades, com consideração da justiça climática. O potencial ou a eficácia de algumas opções de adaptação e mitigação diminui à medida que a mudança do clima se intensifica (consulte também as seções 3.2, 3.3.3, 4.5). (*alta confiança*) {WGII SPM C.2, WGII Figura SPM.4b; WGIII SPM D.1, WGIII SPM D.1.2, WGIII TS.5.1, WGIII Figura SPM.8; SR1.5 SPM D.3, SR1.5 SPM D.4; SRCCL SPM B.2, SRCCL SPM B.3, SRCCL SPM D.3.2, SRCCL Figura SPM.3}

No setor energético, as transições para sistemas de baixas emissões terão múltiplos cobenefícios, incluindo melhorias na qualidade do ar e na saúde. Existem sinergias potenciais entre o desenvolvimento sustentável e, por exemplo, eficiência energética e a energia renovável. (*alta confiança*) {WGIII SPM C.4.2, WGIII SPM D.1.3}

Para a agricultura, a terra e os sistemas alimentares, muitas opções de gestão da terra/do solo e opções de resposta voltadas para a demanda

[80] *Overshoot* ("ultrapassagem") limitado refere-se a exceder 1,5ºC de aquecimento global em até cerca de 0,1ºC, alto *overshoot* em 0,1ºC-0,3ºC, em ambos os casos por até várias décadas. {WGIII Caixa SPM.1}

[81] Consulte o Anexo I: Glossário.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 107

(por exemplo, escolhas de dietas, redução das perdas pós-colheita, redução do desperdício de alimentos) podem contribuir para erradicar a pobreza e eliminar a fome ao mesmo tempo em que promovem a boa saúde e o bem-estar, água limpa e saneamento, e a vida na terra (*confiança média*). Em contraste, certas opções de adaptação que promovem a intensificação da produção, como a irrigação, podem ter efeitos negativos sobre a sustentabilidade (por exemplo, para a biodiversidade, serviços ecossistêmicos, esgotamento das águas subterrâneas e qualidade da água) (*alta confiança*). {WGII TS.D.5.5; WGIII SPM D.10; SRCCL SPM B.2.3}

Reflorestamento, melhor gerenciamento florestal, sequestro de carbono no solo, restauração de turfeiras e gerenciamento do carbono azul da costa são exemplos de métodos de CDR que podem melhorar a biodiversidade e as funções dos ecossistemas, o emprego e a subsistência locais, dependendo do contexto.[82] Entretanto, o florestamento ou produção de culturas de biomassa para bioenergia com captura e armazenamento de dióxido de carbono ou biocarvão pode ter impactos socioeconômicos e ambientais adversos, inclusive sobre a biodiversidade, segurança alimentar e hídrica, subsistência local e direitos dos Povos Indígenas, especialmente se implementado em larga escala e onde a posse da terra é insegura. (*alta confiança*) {WGII SPM B.5.4, WGII SPM C.2.4; WGIII SPM C.11.2; SR1.5 SPM C.3.4, SR1.5 SPM C.3.5; SRCCL SPM B.3, SRCCL SPM B.7.3, SRCCL Figura SPM.3}

As trajetórias modeladas que assumem o uso mais eficiente dos recursos ou que reorientam o desenvolvimento global em direção à sustentabilidade incluem menos desafios, como a dependência de CDR e a pressão sobre a terra e a biodiversidade, e têm as sinergias mais nítidas no que diz respeito ao desenvolvimento sustentável (*alta confiança*). {WGIII SPM C.3.6; SR1.5 SPM D.4.2}

Reforçar as ações de mitigação da mudança do clima implica transições mais rápidas e maiores investimentos iniciais, mas será benéfico por evitar danos causados pela mudança do clima e reduzir os custos de adaptação. Os efeitos agregados da mitigação da mudança do clima sobre o PIB global (excluindo os danos da mudança do clima e os custos de adaptação) são pequenos em comparação com o crescimento projetado do PIB global. As estimativas projetadas de danos econômicos líquidos agregados globais e os custos de adaptação, em geral, aumentam com o nível de aquecimento global. (*alta confiança*) {WGII SPM B.4.6, WGII TS.C.10; WGIII SPM C.12.2, WGIII SPM C.12.3}

A análise custo-benefício permanece limitada em sua capacidade de representar todos os danos decorrentes da mudança do clima, incluindo danos não monetários, ou de captar a natureza heterogênea dos danos e o risco de danos catastróficos (*alta confiança*). Mesmo sem considerar esses fatores ou os cobenefícios da mitigação, os benefícios globais de limitar o aquecimento a 2ºC excedem o custo da mitigação (*confiança média*). Esta descoberta é robusta contra uma ampla gama de suposições sobre preferências sociais sobre desigualdades e descontos ao longo do tempo (*confiança média*). Limitar o aquecimento global a 1,5ºC ao invés de 2ºC aumentaria os custos da mitigação, mas também aumentaria os benefícios em termos de redução de impactos e riscos relacionados (consulte 3.1.1, 3.1.2) e redução das necessidades de adaptação (*alta confiança*)[82]. {WGII SPM B.4, WGII SPM B.6; WGIII SPM C.12, WGIII SPM C.12.2, WGIII SPM C.12.3 WGIII Caixa TS.7; SR1.5 SPM B.3, SR1.5 SPM B.5, SR1.5 SPM B.6}

Considerando outras dimensões do desenvolvimento sustentável, tais como os potencialmente fortes benefícios econômicos para a saúde humana decorrentes da melhoria da qualidade do ar, podem aumentar os benefícios estimados da mitigação (*confiança média*). Os efeitos econômicos das ações de mitigação reforçadas variam entre regiões e países, dependendo notavelmente da estrutura econômica, da redução das emissões regionais, do desenho de políticas e do nível de cooperação internacional (*alta confiança*). Trajetórias ambiciosas de mitigação implicam grandes e às vezes mudanças disruptivas na estrutura econômica, com implicações para ações de curto prazo (Seção 4.2), equidade (Seção 4.4), sustentabilidade (Seção 4.6) e financiamento (Seção 4.8) (*alta confiança*). {WGIII SPM C.12.2, WGIII SPM D.3.2, WGIII TS.4.2}

3.4.2. Avançando a Ação Climática Integrada para o Desenvolvimento Sustentável

Uma abordagem inclusiva e equitativa para integrar adaptação, mitigação e desenvolvimento pode fazer avançar o desenvolvimento sustentável a longo prazo *(alta confiança)*. Respostas integradas podem aproveitar as sinergias para o desenvolvimento sustentável e reduzir *trade-offs* (*alta confiança*). A reorientação de trajetórias de desenvolvimento para a sustentabilidade e o avanço do desenvolvimento resistente ao clima é possível quando os governos, a sociedade civil e o setor privado fazem escolhas de desenvolvimento que priorizam a redução de risco, equidade e justiça, e quando os processos de tomada de decisão, financiamento e ações são integrados entre os níveis de governança, setores e prazos (*confiança muito alta*) (consulte também Figura 4.2). Processos inclusivos envolvendo o conhecimento local e o conhecimento indígena aumentam estas perspectivas (*alta confiança*). Entretanto, as oportunidades de ação diferem substancialmente entre e dentro das regiões, impulsionadas por padrões históricos e contínuos de desenvolvimento (*confiança muito alta*). O apoio financeiro acelerado aos países em desenvolvimento é fundamental para melhorar as ações de mitigação e adaptação (*alta confiança*). {WGII SPM C.5.4, WGII SPM D.1, WGII SPM D.1.1, WGII SPM D.1.2, WGII SPM D.2, WGII SPM D.3, WGII SPM D.5, WGII SPM D.5, WGII SPM D.5.2; WGIII SPM D.1, WGIII SPM D.2, WGIII SPM D.2.4, WGIII SPM E.2.2, WGIII SPM E.2.3, WGIII SPM E.5.3, WGIII Caixa de Capítulo Transversal 5}[83]

Políticas que reorientam as trajetórias de desenvolvimento em direção à sustentabilidade podem ampliar o portfólio de respostas de mitigação e adaptação disponíveis (*confiança média*). Combinar a mitigação com ações para reorientar as

[82] Os impactos, riscos e cobenefícios da implantação de CDR para ecossistemas, biodiversidade e pessoas serão altamente variáveis dependendo do método, contexto específico do local, implementação e escala *(alta confiança).* {WGIII SPM C.11.2}

[83] A evidência é muito limitada para uma conclusão robusta semelhante para limitar o aquecimento a 1,5ºC. {WGIII SPM NOTA DE RODAPÉ 68}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 108

trajetórias de desenvolvimento, tais como políticas setoriais mais amplas, abordagens que induzem mudanças de estilo de vida ou de comportamento, regulação financeira ou políticas macroeconômicas pode superar barreiras e abrir uma gama mais ampla de opções de mitigação (*alta confiança*). O planejamento integrado e inclusivo e o investimento na tomada de decisões diárias sobre a infraestrutura urbana podem aumentar significativamente a capacidade de adaptação dos assentamentos urbanos e rurais. As cidades costeiras e os assentamentos desempenham um papel importante no avanço do desenvolvimento resiliente ao clima devido ao alto número de pessoas que vivem na Zona Costeira de Baixa Elevação, ao risco crescente e climático composto que enfrentam e ao seu papel vital nas economias nacionais e além (*alta confiança*).
{WGII SPM.D.3, WGII SPM D.3.3; WGIII SPM E.2, WGIII SPM E.2.2; SR1.5 SPM D.6}

Os impactos adversos observados e as perdas e danos relacionados, os riscos projetados, as tendências de vulnerabilidade e os limites de adaptação demonstram que a transformação para a sustentabilidade e a ação de desenvolvimento resiliente ao clima é mais urgente do que anteriormente avaliada (*confiança muito alta*). O desenvolvimento resiliente ao clima integra a adaptação e a mitigação dos GEE para fazer avançar o desenvolvimento sustentável para todos. As trajetórias de desenvolvimento resilientes ao clima têm sido limitadas pelo desenvolvimento, emissões e mudança do clima do passado e são progressivamente limitadas por cada incremento de aquecimento, em particular acima de 1,5ºC (*confiança muito alta*). O desenvolvimento resiliente ao clima não será possível em algumas regiões e sub-regiões se o aquecimento global exceder 2ºC (*confiança média*). Salvaguardar a biodiversidade e os ecossistemas é fundamental para o desenvolvimento resiliente ao clima, mas a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos têm capacidade limitada para se adaptar ao aumento dos níveis de aquecimento global, tornando o desenvolvimento resiliente ao clima progressivamente mais difícil de alcançar acima de 1,5ºC de aquecimento (*confiança muito alta*). {WGII SPM D.1, WGII SPM D.1.1, WGII SPM D.4, WGII SPM D.4.3, WGII SPM D.5.1; WGIII SPM D.1.1}

A evidência científica acumulada é inequívoca: a mudança do clima é uma ameaça ao bem-estar humano e à saúde planetária (*confiança muito alta*). Qualquer atraso adicional na ação global coordenada antecipatória sobre adaptação e mitigação significa perder uma breve, que se fecha rapidamente, janela de oportunidade para assegurar um futuro viável e sustentável para todos (*confiança muito alta*). As oportunidades de ação a curto prazo são avaliadas na seção seguinte. {WGII SPM D.5.3; WGIII SPM D.1.1}

Seção 4
Respostas no Curto Prazo para um Clima em Mudança

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 110

Seção 4: Respostas no Curto Prazo para um Clima em Mudança

4.1 Temporalidade e Urgência da Ação Climática

A mitigação profunda, rápida e sustentada e a implementação acelerada da adaptação reduzem os riscos da mudança do clima para os seres humanos e os ecossistemas. Nas trajetórias modeladas que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) com ou sem *overshoot* limitado ("sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada") e naquelas que limitam o aquecimento a 2ºC (>67%) e pressupõem ação imediata, projeta-se que as emissões globais de GEE atinjam o pico no início da década de 2020, seguido de reduções rápidas e profundas. Como as opções de adaptação muitas vezes têm longos tempos de implementação, a implementação acelerada da adaptação, particularmente nesta década, é importante para reduzir as lacunas de adaptação. *(alta confiança)*

A magnitude e a taxa da mudança do clima e dos riscos associados dependem fortemente das ações de mitigação e adaptação a curto prazo (*confiança muito alta*). É *mais provável do que improvável* que o aquecimento global atinja 1,5ºC entre 2021 e 2040, mesmo nos cenários de emissão de GEE muito baixos (SSP1-1.9), e *é provável* ou *muito provável* que ultrapasse 1,5ºC nos cenários de emissão mais altos[84]. Muitas opções de adaptação têm viabilidade média ou alta até 1,5ºC *(confiança média a alta*, dependendo da opção), mas limites rígidos de adaptação já foram atingidos em alguns ecossistemas e a eficácia da adaptação para reduzir o risco climático diminuirá com o aumento do aquecimento (*alta confiança*). As escolhas e ações implementadas pela sociedade nesta década determinam até que ponto as trajetórias de médio e longo prazo proporcionarão um desenvolvimento mais ou menos resistente ao clima (*alta confiança*). As perspectivas de desenvolvimento resilientes ao clima são cada vez mais limitadas se as atuais emissões de gases de efeito estufa não diminuírem rapidamente, especialmente se o aquecimento global de 1,5ºC for ultrapassado no curto prazo (*alta confiança*). Sem ações urgentes, eficazes e equitativas de adaptação e mitigação, a mudança do clima ameaça cada vez mais a saúde e a subsistência das pessoas em todo o mundo, a saúde dos ecossistemas e a biodiversidade, com graves consequências adversas para as gerações atuais e futuras (*alta confiança*). {WGI SPM B.1.3, WGI SPM B.5.1, WGI SPM B.5.2; WGII SPM A, WGII SPM B.4, WGII SPM C.2, WGII SPM C.3.3, WGII Figura SPM.4, WGII SPM D.1, WGII SPM D.5, WGIII SPM D.1.1 SR1.5 SPM D.2.2}. (Caixa de Seção Transversal 2, Figura 2.1, Figura 2.3)

Nas trajetórias modeladas que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) com ou sem *overshoot* limitado ("sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada") e naquelas que limitam o aquecimento a 2ºC (>67%), assumindo ações imediatas, projeta-se que as emissões globais de GEE atinjam o pico no início da década de 2020, seguido de reduções de emissões de GEE rápidas e profundas (*alta confiança*)[85]**.** Em trajetórias que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%), com ou sem *overshoot* limitado ("sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada"), projeta-se que as emissões globais líquidas de gases de efeito estufa diminuam em 43% [34–60%][86] abaixo dos níveis de 2019 até 2030, 60% [49–77%] até 2035, 69% [58–90%] até 2040 e 84% [73-98%] (*alta confiança*) (Seção 2.3.1, Tabela 2.2, Figura 2.5, Tabela 3.1)[87]. Trajetórias modeladas globalmente que limitam o aquecimento a 2ºC (>67%) têm reduções nas emissões de GEE abaixo dos níveis de 2019 de 21% [1–42]% até 2030, 35% [22–55%] até 2035, 46% [34–63%] até 2040 e 64% [53–77%] até 2050[88] (*alta confiança*). As emissões globais de GEE associadas às NDCs anunciadas antes da COP26 tornariam *provável* que o aquecimento excedesse 1,5ºC (*alta confiança*) e limitar o aquecimento a 2ºC (>67%) implicaria então uma rápida aceleração das reduções de emissões durante 2030–2050, cerca de 70% mais rápido do que nas trajetórias onde são tomadas medidas imediatas para limitar o aquecimento a 2ºC (>67%) (*confiança média*) (Seção 2.3.1) Investimentos contínuos em infraestrutura de alta emissão sem abatimento[89] e desenvolvimento e implantação limitados de alternativas de baixas emissões antes de 2030 atuariam como barreiras a esta aceleração e aumentariam os riscos de viabilidade (*alta confiança*). {WGIII SPM B.6.3, WGIII Capítulo 3.5.2, WGIII SPM B.6, WGIII SPM B.6., WGIII SPM C.1, WGIII SPM C1.1, Tabela SPM.2} (Caixa de Seção Transversal.2)

[84] No curto prazo (2021–2040), é *muito provável* que o nível de aquecimento global de 1,5ºC seja excedido no cenário de emissões muito altas de GEE (SSP5–8.5), é *provável* que seja excedido no cenário de emissões intermediárias e altas de GEE (SSP2–4.5, SSP3–7.0), é mais provável do que improvável que seja excedido no cenário de emissões baixas de GEE (SSP1–2.6) e é *mais provável do que improvável* que seja alcançado no cenário de emissões muito baixas de GEE (SSP1–1.9). As melhores estimativas [e faixas muito *prováveis*] de aquecimento global para os diferentes cenários a curto prazo são: 1,5ºC [1,2ºC–1,7ºC] (SSP1–1.9); 1,5ºC [1,2ºC–1,8ºC] (SSP1–2.6); 1,5ºC [1,2ºC–1,8ºC] (SSP2–4.5); 1,5ºC [1,2ºC–1,8ºC] (SSP2–4.5); 1,5ºC [1,2ºC–1,8ºC] (SSP3–7.0); e 1,6ºC [1,3ºC–1,9ºC] (SSP5–8.5). {WGI SPM B.1.3, WGI Tabela SPM.1} (Caixa de Seção Transversal.2)

[85] Valores entre parênteses indicam a probabilidade de limitar o aquecimento ao nível especificado (consulte a Caixa de Seção Transversal.2).

[86] Faixa mediana e *muito provável* [5º a 95º percentil] {WGIII SPM nota de rodapé 30}.

[87] Estes números para CO_2 são 48% [36-69%] em 2030, 65% [50-96%] em 2035, 80% [61-109%] em 2040 e 99 [79-119%] em 2050.

[88] Estes números para CO_2 são 22% [1-44%] em 2030, 37% [21-59%] em 2035, 51% [36-70%] em 2040 e 73% [55-90%] em 2050

[89] Neste contexto, "combustíveis fósseis sem abatimento" refere-se aos combustíveis fósseis produzidos e utilizados sem intervenções que reduzam substancialmente a quantidade de GEE emitida ao longo do ciclo de vida; por exemplo, capturando 90% ou mais CO_2 de usinas elétricas, ou 50–80% de emissões fugitivas de metano do fornecimento de energia {WGIII SPM nota de rodapé 54}.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 111

Todas as trajetórias modeladas globalmente que limitam o aquecimento a 2ºC (>67%) ou inferior até 2100 envolvem reduções tanto nas emissões líquidas de CO_2 quanto nas emissões que não sejam de CO_2 (consulte Figura 3.6) (***alta confiança*****).** Por exemplo, em trajetórias que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) com ou sem *overshoot* limitado ("sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada"), as emissões globais de CH_4 (metano) são reduzidas em 34% [21–57%] abaixo dos níveis de 2019 até 2030 e em 44% [31–63%] em 2040 (*alta confiança*).
As emissões globais de CH_4 são reduzidas em 24% [9–53%] abaixo dos níveis de 2019 até 2030 e em 37% [20–60%] em 2040 em trajetórias modeladas que limitam o aquecimento a 2ºC com ação a partir de 2020 (>67%) (*alta confiança*).
{WGIII SPM C1.2, WGIII Tabela SPM.2, WGIII Capítulo 3.3; SR1.5 SPM C.1, SR1.5 SPM C.1.2} (Caixa de Seção Transversal. 2)

Todos as trajetórias modeladas globalmente que limitam o aquecimento a 2ºC (>67%) ou inferior até 2100 envolvem reduções de emissão de GEE em todos os setores (*alta confiança*). As contribuições dos diferentes setores variam conforme as trajetórias modeladas de mitigação. Na maioria das trajetórias de mitigação modeladas globalmente, as emissões provenientes do uso da terra, mudança do uso da terra e da silvicultura, através de reflorestamento e redução do desmatamento, e do setor de fornecimento de energia, atingem emissões líquidas zero de CO_2 antes dos setores de construção, indústria e transporte (Figura 4.1). As estratégias podem depender de combinações de diferentes opções (Figura 4.1, Seção 4.5), mas fazer menos em um setor precisa ser compensado por outras reduções em outros setores para que o aquecimento seja limitado. (*alta confiança*) {WGIII SPM C.3, WGIII SPM C.3.1, WGIII SPM 3.2, WGIII SPM C.3.3} (Caixa de Seção Transversal.2)

Sem ações rápidas, profundas e sustentadas de mitigação e adaptação acelerada, as perdas e danos continuarão a aumentar, incluindo impactos adversos projetados na África, LDCs, SIDS, América Central e do Sul[90], Ásia e Ártico, e afetarão desproporcionalmente as populações mais vulneráveis (*alta confiança*). {WGII SPM C.3.5; WGII SPM B.2.4; WGII Atlas Global a Regional Anexo A1.15, A1.27; WGII 12.2; WGII 10. Caixa 10.6; WGII TS D.7.5; WGII CCB6 ES; SR1.5 SPM B.5.3; SR 1.5 SPM B.5.7;
SRCCL A.5.6} (Figura 3.2; Figura 3.3)

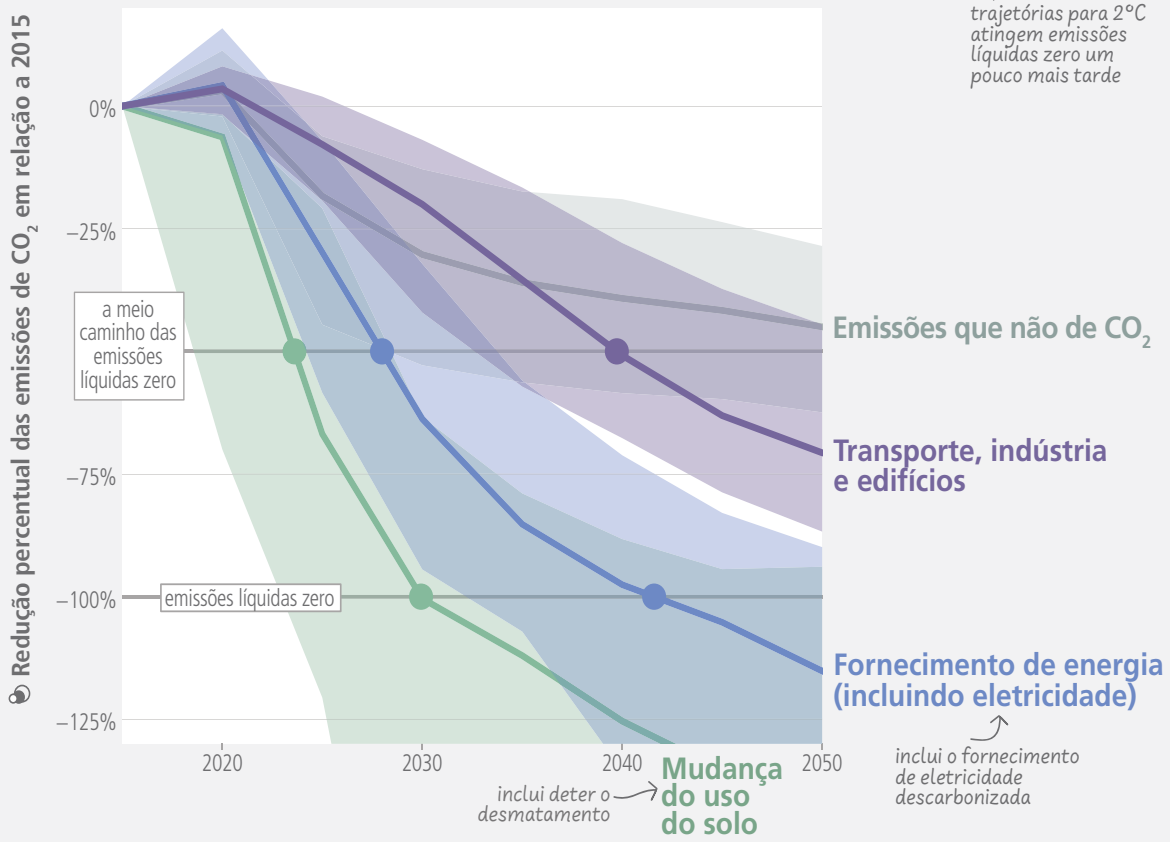
[90] A parte sul do México está incluída na sub-região climática da América Central do Sul (SCA) para o WGI. O México é avaliado como parte da América do Norte para o WGII. A literatura sobre mudanças do clima para a região da SCA ocasionalmente inclui o México e, nesses casos, a avaliação do WGII faz referência à América Latina. O México é considerado parte da América Latina e do Caribe para o WGIII. {WGII 12.1.1, WGIII AII.1.1}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 112

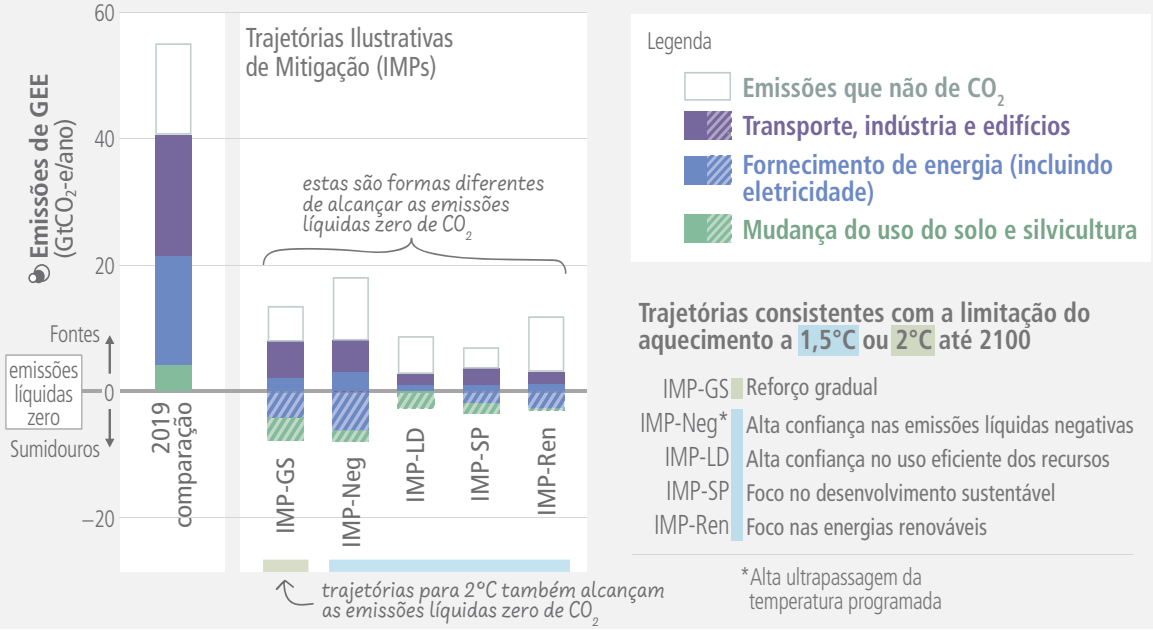
A transição para emissão líquida zero de CO_2 terá um ritmo diferente em diferentes setores

As emissões de CO_2 do setor das indústrias de eletricidade/combustíveis fósseis e as mudanças no uso do solo, em geral, chegam a emissões líquidas zero antes do que em outros setores

a) Emissões setoriais em trajetórias que limitam o aquecimento a 1,5°C



b) Emissões de gases de efeito estufa por setor no momento da emissão líquida zero de CO_2, em comparação com 2019



Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 113

Figura 4.1: Emissões setoriais em trajetórias que limitam o aquecimento a 1,5ºC. O Painel (a) mostra as emissões setoriais de CO_2 e emissões que não são de CO_2 em trajetórias modeladas globalmente que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%), com ou sem *overshoot* limitado ("sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada"). As linhas horizontais ilustram a redução pela metade das emissões de 2015 (ano base das trajetórias) (tracejado) e o alcance de emissões líquidas zero (linha sólida). A faixa mostra o 5º–95º percentil das emissões ao longo das trajetórias. O cronograma difere fortemente por setor, com as emissões de CO_2 do setor das indústrias de eletricidade/combustíveis fósseis e a mudança de uso do solo, em geral, atingindo emissões líquidas zero mais cedo. As emissões que não são de CO_2 da agricultura também são substancialmente reduzidas em comparação com as trajetórias sem política climática, mas normalmente não chegam a zero. **Painel (b)** Embora todos as trajetórias incluam emissões fortemente reduzidas, existem trajetórias diferentes conforme indicado pelas trajetórias ilustrativas de mitigação utilizadas no WGIII do IPCC. As trajetórias enfatizam rotas consistentes com a limitação do aquecimento a 1,5ºC com uma alta dependência de emissões líquidas negativas (IMP-Neg), alta eficiência de recursos (IMP-LD), um foco no desenvolvimento sustentável (IMP-SP) ou energias renováveis (IMP-Ren) e consistente com 2ºC com base em uma introdução menos rápida de medidas de mitigação seguida por um subsequente reforço gradual (IMP-GS).
As emissões positivas (barras de preenchimento sólido) e negativas (barras tracejadas) para diferentes trajetórias ilustrativas de mitigação são comparadas às emissões de GEE do ano de 2019. A categoria "fornecimento de energia (incluindo eletricidade)" inclui a bioenergia com captura e armazenamento de carbono e captura direta de carbono do ar e seu armazenamento. {WGIII Caixa TS.5, 3.3, 3.4, 6.6, 10.3, 11.3} (Caixa de Seção Transversal 2)

4.2 Benefícios do Fortalecimento da Ação no Curto Prazo

A implementação acelerada da adaptação melhorará o bem-estar, reduzindo perdas e danos, especialmente para as populações vulneráveis. Ações de mitigação profundas, rápidas e sustentadas reduziriam futuros custos de adaptação e perdas e danos, aumentariam os sob cobeneficiário do desenvolvimento sustentável, evitariam a dependência de fontes de emissão e reduziriam os ativos estagnados e as mudanças do clima irreversíveis. Essas ações de curto prazo envolvem maiores investimentos iniciais e mudanças disruptivas, que podem ser moderadas por uma série de condições de capacitação e remoção ou redução de barreiras à viabilidade. *(alta confiança)*

A implementação acelerada de respostas de adaptação trará benefícios ao bem-estar humano (*alta confiança*) (Seção 4.3). Como as opções de adaptação muitas vezes têm longos tempos de implementação, o planejamento a longo prazo e a implementação acelerada, particularmente nesta década, é importante para reduzir as lacunas de adaptação, reconhecendo que restrições permanecem para algumas regiões. Os benefícios para as populações vulneráveis seriam elevados (consulte seção 4.4). (*alta confiança)* {WGISPM B.1, WGI SPM B.1.3, WGI SPM B.2.2, WGI SPM B.3; WGII SPM C.1.1, WGII SPM C.1.2, WGII SPM C.2, WGII SPM C.3.1, WGII SPM Figura SPM.4b; SROCC SPM C.3.4, SROCC Figura 3.4, SROCC SPM Figura 5}

Ações de curto prazo que limitem o aquecimento global a cerca de 1,5ºC reduziriam substancialmente perdas e danos projetados relacionados à mudança do clima nos sistemas humanos e ecossistemas, em comparação com níveis de aquecimento mais altos, mas não podem eliminar todos eles (*confiança muito alta*). A magnitude e a taxa da mudança do clima e os riscos associados dependem fortemente das ações de mitigação e adaptação a curto prazo, e os impactos adversos projetados e as perdas e danos relacionados aumentam a cada incremento no aquecimento global (*confiança muito alta*). As ações de mitigação adiadas aumentarão ainda mais o aquecimento global, o que diminuirá a eficácia de muitas opções de adaptação, incluindo a Adaptação baseada em Ecossistemas e muitas opções relacionadas à água, bem como o aumento dos riscos de viabilidade de mitigação, como para opções baseadas em ecossistemas (*alta confiança*). Respostas abrangentes, eficazes e inovadoras integrando adaptação e mitigação podem aproveitar sinergias e reduzir trade-offs entre adaptação e mitigação, bem como no cumprimento dos requisitos de financiamento (*confiança muito alta*) (consulte Seção 4.5, 4.6, 4.8 e 4.9) {WGII SPM B.3 , WGII SPM B.4, WGII SPM B.6.2, WGII SPM C.2, WGII SPM C.3, WGII SPM D.1, WGII SPM D.4.3, WGII SPM D.5, WG II TS D.1.4, WG II TS.D.5, WGII TS D.7.5, WGIII SPM B.6.3,WGIII SPM B.6.4, WGIII SPM C.9, WGIII SPM D.2, WGIII SPM E.13, SR1.5 SPM C.2.7, SR1.5 D.1.3, SR1.5 D.5.2}.

As ações de mitigação terão outros cobenefícios do desenvolvimento sustentável (*alta confiança*). A mitigação melhorará a qualidade do ar e a saúde humana a curto prazo, principalmente porque muitos poluentes do ar são coemitidos pelos setores emissores de GEE e porque as emissões de metano levam à formação de ozônio de superfície (*alta confiança*). Os benefícios da melhoria da qualidade do ar incluem a prevenção de mortes prematuras relacionadas à poluição do ar, doenças crônicas e danos aos ecossistemas e cultivos. Os benefícios econômicos para a saúde humana decorrentes da melhoria da qualidade do ar, resultantes das ações de mitigação, podem ser da mesma ordem de grandeza que os custos de mitigação, e potencialmente ainda maiores (*confiança média*). Como o metano tem uma vida útil curta, mas é um potente GEE, reduções fortes, rápidas e sustentadas nas emissões de metano podem limitar o aquecimento a curto prazo e melhorar a qualidade do ar reduzindo o ozônio de superfície global (*alta confiança*). {WGI SPM D.1.7, WGI SPM D.2.2, WGI Capítulo 6.7, WGI TS Caixa TS.7, WGI Capítulo 6 Caixa 6.2, WGI Figuras 6.3, 6.16, 6.17, WGII TS.D.8.3, WGII Caixa de Capítulo Transversal SAÚDE, WGII Capítulo 5 ES, WGII Capítulo 7 ES; WGII Capítulo 7.3.1.2; WGIII Figura SPM.8, WGIII SPM C.2.3, WGIII SPM C.4.2, WGIII TS.4.2}

Os desafios das ações de adaptação e mitigação atrasadas incluem o risco de escalada de custos, engessamento (*lock-in*) de infraestrutura, ativos estagnados e viabilidade e eficácia reduzidas das opções de adaptação e mitigação (*alta confiança*). A instalação contínua de uma infraestrutura de combustível fóssil[91] sem abatimento "engessará" ("*lock-in*") as emissões

[91] Neste contexto, "combustíveis fósseis sem abatimento" refere-se aos combustíveis fósseis produzidos e utilizados sem intervenções que reduzam substancialmente a quantidade de GEE emitida ao longo do ciclo de vida; por exemplo, capturando 90% ou mais CO_2 de usinas elétricas, ou 50–80% de emissões fugitivas de metano do fornecimento de energia {WGIII SPM nota de rodapé 54}.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 114

de GEE (*alta confiança*). Limitar o aquecimento global a 2ºC ou abaixo deixará uma quantidade substancial de combustíveis fósseis sem queimar e poderá estagnar uma infraestrutura considerável de combustíveis fósseis (*alta confiança*), com valor global descontado projetado em torno de US$1–4 trilhões de dólares de 2015 a 2050 (*confiança média*). Ações antecipadas limitariam o tamanho desses ativos estagnados, ao passo que ações postergadas com investimentos contínuos em infraestrutura de alta emissão sem abatimento e com desenvolvimento e implantação limitados de alternativas de baixa emissão antes de 2030 elevariam os futuros ativos estagnados para o limite superior do intervalo – atuando como barreiras e aumentando os riscos de viabilidade da economia política que podem comprometer os esforços para limitar o aquecimento global (*alta confiança*). {WGIII SPM B.6.3, WGIII SPM C.4, WGIII Caixa TS.8}.

A ampliação das ações climáticas de curto prazo (Seção 4.1) mobilizará uma combinação de opções de baixo custo e alto custo. Opções de alto custo, como em energia e infraestrutura, são necessárias para evitar futuros engessamentos (*lock-ins*), fomentar a inovação e iniciar mudanças transformacionais (Figura 4.4). Trajetórias de desenvolvimento resilientes ao clima em apoio ao desenvolvimento sustentável para todos são moldadas pela equidade e pela justiça social e climática (*confiança muito alta*). A incorporação de adaptação e mitigação eficazes e equitativas no planejamento do desenvolvimento pode reduzir a vulnerabilidade, conservar e restaurar ecossistemas e permitir um desenvolvimento resiliente ao clima. Isso é especialmente desafiador em localidades com diferenças persistentes de desenvolvimento e recursos limitados. (*alta confiança*) {WGII SPM C.5, WGII SPM D1; WGIII TS.5.2, WGIII Seção 8.3.1, WGIII Seção 8.3.4, WGIII Seção 8.4.1, WGIII Seção 8.6}.

A ampliação da ação climática pode gerar mudanças disruptivas na estrutura econômica com consequências distributivas e a necessidade de conciliar interesses, valores e visões de mundo divergentes, dentro e entre países. Reformas fiscais, financeiras, institucionais e reguladoras mais profundas podem compensar tais efeitos adversos e desbloquear potenciais de mitigação. As escolhas e ações da sociedade implementadas nesta década determinarão até que ponto as trajetórias de desenvolvimento de médio e longo prazo produzirão resultados de desenvolvimento mais ou menos resistentes ao clima. (*alta confiança*) {WGII SPM D.2, WGII SPM D.5, WGII Caixa TS.8; WGIII SPM D.3, WGIII SPM E.2, WGIII SPM E.3, WGIII SPM E.4, WGIII TS.2, WGIII TS.4.1, WGIII TS.6.4, WGIII Capítulo 15.2, WGIII Capítulo 15.6,}

As condições habilitadoras precisariam ser reforçadas a curto prazo e as barreiras, reduzidas ou removidas, para realizar oportunidades de ações profundas e rápidas de adaptação e mitigação e desenvolvimento resistente ao clima *(alta confiança)* (Figura 4.2). Estas condições habilitadoras são diferenciadas por circunstâncias e geografias nacionais, regionais e locais, de acordo com as capacidades, e incluem: equidade e inclusão na ação climática (consulte seção 4.4), transições rápidas e de longo alcance em setores e sistemas (consulte seção 4.5), medidas para alcançar sinergias e reduzir *trade-offs* com objetivos de desenvolvimento sustentável (consulte Seção 4.6), melhorias de governança e políticas (consulte Seção 4.7), acesso ao financiamento, melhoria da cooperação internacional e melhorias tecnológicas (consulte Seção 4.8), e integração de ações de curto prazo entre setores, sistemas e regiões (consulte Seção 4.9). {WGII SPM D.2, WGIII SPM E.1, WGIII SPM E.2}

Barreiras à viabilidade precisariam ser reduzidas ou removidas para implantar opções de mitigação e adaptação em escala. Muitos limites à viabilidade e eficácia das respostas podem ser superados abordando uma série de barreiras, incluindo econômicas, tecnológicas, institucionais, sociais, ambientais e geofísicas. A viabilidade e eficácia das opções aumentam com soluções integradas e multissetoriais que diferenciam respostas baseadas no risco climático, atravessam sistemas e abordam as inequidades sociais. Ações reforçadas a curto prazo em trajetórias modeladas de custo-efetividade que limitam o aquecimento global a 2ºC ou menos, reduzem o risco geral para a viabilidade das transições de sistema, em comparação com trajetórias modeladas com ação retardada ou descoordenada. (*alta confiança*) {WGII SPM C.2, WGII SPM C.3, WGII SPM C.5; WGIII SPM E.1, WGIII SPM E.1.3}.

A integração de ações climáticas ambiciosas com políticas macroeconômicas sob incerteza global traria benefícios (*alta confiança*). Isto abrange três direções principais: (a) pacotes de integração de toda a economia apoiando opções para melhorar a recuperação econômica sustentável de baixas emissões, programas de desenvolvimento e criação de empregos (Seções 4.4, 4.5, 4.6, 4.8, 4.9) (b) redes de segurança e proteção social na transição (Seções 4.4, 4.7); e (c) acesso ampliado ao financiamento, tecnologia e capacitação e apoio coordenado à infraestrutura de baixas emissões (potencial de dar um salto tecnológico (*leap-frogging*)), especialmente em regiões em desenvolvimento, e sob tensão por dívidas (*alta confiança*). (Seção 4.8) {WGII SPM C.2, WGII SPM C.4.1, WGII SPM D.1.3, WGII SPM D.2, WGII SPM D.3.2, WGII SPM E.2.2, WGII SPM E.4, WGII SPM TS.2, WGII SPM TS.5.2, WGII TS.6.4, WGII TS.15, WGII TS Caixa TS.3 WGIII SPM B.4.2, WGIII SPM C.5.4, WGIII SPM C.6.2, WGIII SPM C.12.2, WGIII SPM D.3.4, WGIII SPM E.4.2, WGIII SPM E.4.5, WGIII SPM E.5.2, WGIII SPM E.5.3, WGIII TS.1, WGIII Caixa TS.15, WGIII Capítulo 15.2, WGIII Caixa de Capítulo Transversal 1 sobre COVID no Capítulo 1}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 115

Há uma janela de oportunidade que se estreita rapidamente para permitir um desenvolvimento resiliente ao clima

Múltiplas escolhas e ações que interajam entre si podem mudar as trajetórias do desenvolvimento em direção à sustentabilidade

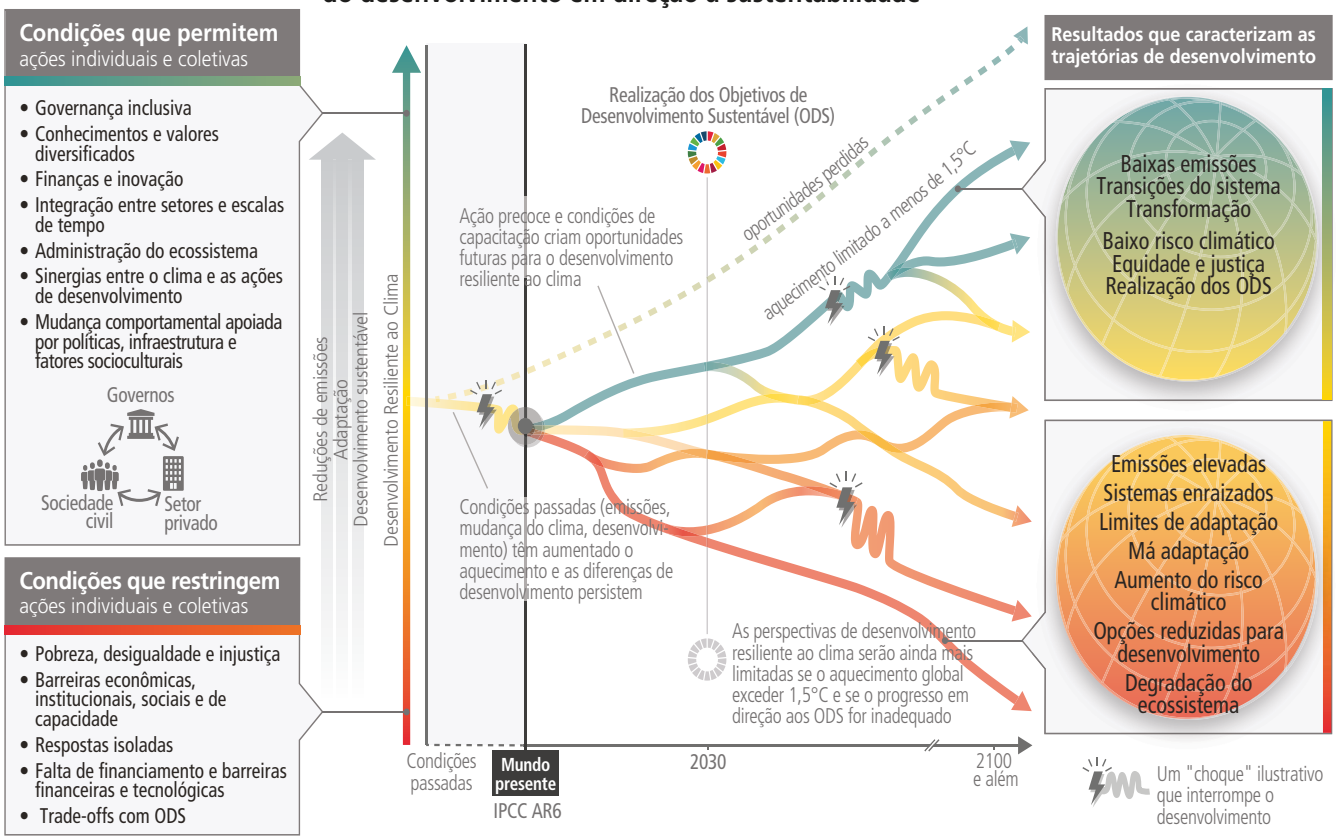


Figura 4.2: As trajetórias ilustrativas de desenvolvimento (vermelho para verde) e resultados associados (painel direito) mostram que existe uma janela de oportunidade que se estreita rapidamente para assegurar um futuro habitável e sustentável para todos. O desenvolvimento resistente ao clima é o processo de implementação de medidas de mitigação de gases de efeito estufa e de adaptação para apoiar o desenvolvimento sustentável. As trajetórias divergentes ilustram que as escolhas e ações interativas feitas por diversos atores do governo, do setor privado e da sociedade civil podem fazer avançar o desenvolvimento resistente ao clima, mudar as trajetórias em direção à sustentabilidade e permitir menores emissões e adaptação. Diversos conhecimentos e valores incluem valores culturais, Conhecimento Indígena, conhecimento local e conhecimento científico. Eventos climáticos e não climáticos, tais como secas, enchentes ou pandemias, representam choques mais severos em trajetórias com menor desenvolvimento resiliente ao clima (vermelho para amarelo) do que em trajetórias com maior desenvolvimento resiliente ao clima (verde). Há limites de adaptação e capacidade de adaptação para alguns sistemas humanos e naturais ao aquecimento global de 1,5ºC, e com cada aumento de aquecimento, perdas e danos irão aumentar. As trajetórias de desenvolvimento tomadas pelos países em todos os estágios do desenvolvimento econômico impactam as emissões de GEE e, portanto, moldam os desafios e oportunidades de mitigação, que variam entre países e regiões. As trajetórias e oportunidades de ação são moldadas por ações prévias (ou inações e oportunidades perdidas, trajetória tracejada), e condições favoráveis e restritivas (painel esquerdo), e ocorrem no contexto de riscos climáticos, limites de adaptação e diferenças de desenvolvimento. Quanto mais demoradas forem as reduções de emissões, menos opções de adaptação efetivas haverão. {WGI SPM B.1, WGII SPM B.1-B.5, WGII SPM C.2-5, WGII SPM D.1-5, WGII Figura SPM.3; WGII Figura SPM.4, WGII Figura SPM.5; WGII TS.D.5, WGII Capítulo 3.1, WGII Capítulo 3.2, WGII Capítulo 3.4; WGII Capítulo 4.2, WGII Figura 4.4, WGII Capítulo 4.5, WGII Capítulo 4.6, WGII Capítulo 4.9, WGIII SPM A, WGIII SPM B1, WGIII SPM B.3, WGIII SPM B.6, WGIII SPM C.4, WGIII SPM D1-3, WGIII SPM E.1, WGIII SPM E.2, WGIII SPM E.4, WGIII SPM E.5, WGIII Figura TS.1, TS.7, Caixa TS. 3, Caixa TS.8, Caixa de Grupo de Trabalho Transversal 1, WGIII Caixa de Capítulo Transversal 5 no Capítulo 4, SR1.5 SPM D1-6, SRCCL SPM D.3}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 116

4.3 Riscos no Curto Prazo

Muitas mudanças no sistema climático, incluindo eventos extremos, se tornarão maiores a curto prazo com o aumento do aquecimento global (alta confiança). Múltiplos riscos climáticos e não climáticos irão interagir, resultando no aumento dos impactos compostos e em cascata, tornando-se mais difícil de gerenciar (alta confiança). Perdas e danos aumentarão com o aumento do aquecimento global (confiança muito alta), enquanto fortemente concentrados entre as populações vulneráveis mais pobres (alta confiança). A continuidade dos atuais padrões insustentáveis de desenvolvimento aumentaria a exposição e a vulnerabilidade dos ecossistemas e das pessoas às ameaças climáticas (alta confiança).

O aquecimento global continuará aumentando no curto prazo (2021–2040) principalmente devido ao aumento das emissões acumuladas de CO_2 em quase todos os cenários e trajetórias considerados. A curto prazo, todas as regiões do mundo estão projetadas para enfrentar novos aumentos nas ameaças climáticas (*confiança média a alta*, dependendo da região e do perigo), aumentando os riscos múltiplos para os ecossistemas e os seres humanos (*confiança muito alta*). A curto prazo, a variabilidade natural[92] modulará as mudanças causadas pelo ser humano, atenuando ou ampliando as mudanças projetadas, especialmente em escalas regionais, com pouco efeito sobre o aquecimento global centenário. Essas modulações são importantes a serem consideradas no planejamento da adaptação. A temperatura global da superfície em qualquer ano pode variar acima ou abaixo da tendência de longo prazo induzida pelo ser humano, devido à variabilidade natural. Até 2030, a temperatura global da superfície em qualquer ano individual poderá exceder 1,5ºC em relação a 1850–1900 com uma probabilidade entre 40% e 60%, nos cinco cenários avaliados no WGI (*confiança média*). A ocorrência de anos individuais com mudanças na temperatura global da superfície acima de um certo nível não implica que esse nível de aquecimento global tenha sido alcançado. Se uma grande erupção vulcânica explosiva ocorresse a curto prazo[93], ela ocultaria temporária e parcialmente a mudança do clima causada pelo ser humano, reduzindo a temperatura global da superfície e a precipitação, especialmente sobre a terra, por um a três anos (*confiança média*). {WGI SPM B.1.3, WGI SPM B.1.4, WGI SPM C.1, WGI SPM C.2, WGI Caixa de Seção Transversal TS.1, WGI Caixa Capítulo Transversal 4.1; WGII SPM B.3, WGII SPM B.3.1; WGIII Caixa SPM.1 Figura 1}.

O nível de risco para os seres humanos e ecossistemas dependerá das tendências de vulnerabilidade, exposição, nível de desenvolvimento socioeconômico e adaptação a curto prazo (*alta confiança*). A curto prazo, muitos dos riscos climáticos associados aos sistemas naturais e humanos dependem mais fortemente das mudanças na vulnerabilidade e exposição desses sistemas do que das diferenças nas ameaças climáticas entre cenários de emissões (*alta confiança*). A exposição futura às ameaças climáticas está aumentando globalmente devido às tendências de desenvolvimento socioeconômico, incluindo a crescente desigualdade, e quando a urbanização ou migração aumenta a exposição (*alta confiança*). A urbanização aumenta extremos de temperaturas elevadas (*confiança muito alta*) e a intensidade do escoamento de precipitação (*alta confiança*). A urbanização crescente em zonas baixas e costeiras será um fator importante no aumento da exposição a eventos extremos de vazões fluviais e ameaças de elevação do nível do mar, aumentando os riscos (*alta confiança*) (Figura 4.3). A vulnerabilidade também aumentará rapidamente nos Estados em Desenvolvimento de Pequenas Ilhas de baixa altitude e atóis no contexto da elevação do nível do mar (*alta confiança*) (consulte Figura 3.4 e Figura 4.3). A vulnerabilidade humana se concentrará em assentamentos informais e assentamentos menores em rápido crescimento; e a vulnerabilidade em áreas rurais aumentará pela reduzida habitabilidade e alta dependência de meios de subsistência sensíveis ao clima (*alta confiança*).

A vulnerabilidade humana e dos ecossistemas são interdependentes (*alta confiança*). A vulnerabilidade à mudança do clima dos ecossistemas será fortemente influenciada por padrões passados, presentes e futuros de desenvolvimento humano, inclusive de consumo e produção insustentáveis, pressões demográficas crescentes e uso e gerenciamento persistente e insustentável da terra, oceano e água (*alta confiança*). Vários riscos a curto prazo podem ser moderados com a adaptação (*alta confiança*). (consulte Seção 4.5 e 3.2) {WGI SPM C.2.6; WGII SPM B.2, WGII SPM B.2.3, WGII SPM B.2.5, WGII SPM B.3, WGII SPM B.3.2, WGII TS.C.5.2}

As principais ameaças e riscos associados esperados a curto prazo (a 1,5ºC de aquecimento global) são:

- Aumento da intensidade e frequência de extremos de temperaturas elevadas e condições perigosas de calor e umidade, com aumento da mortalidade humana, morbidade e perda de produtividade laboral (*alta confiança*) {WGI SPM B.2.2, WGI TS Figura TS.6; WGII SPM B.1.4, WGII SPM B.4.4, WGII SPM Figura SPM.2}.

- O aumento da frequência de ondas de calor marinhas aumentará os riscos de perda de biodiversidade nos oceanos, inclusive por eventos de mortalidade em massa (*alta confiança*) {WGI SPM B.2.3; WGII SPM B.1.2, WGII SPM Figura SPM.2; SROCC SPM B.5.1}

- Riscos de perda de biodiversidade a curto prazo são moderados a altos nos ecossistemas florestais (*confiança média*) e nos ecossistemas de ervas marinhas (*confiança alta a muito alta*) e são altos a muito altos nos ecossistemas marinhos e terrestres do

[92] Consulte o Anexo I: Glossário. Os principais fenômenos internos de variabilidade incluem El Niño – Oscilação Sul, Variabilidade Decadal do Pacífico e Variabilidade Multi-Decadal do Atlântico através de sua influência regional {WGI SPM nota de rodapé 37}. A variabilidade interna da temperatura global da superfície em qualquer ano é estimada em cerca de ±0,25ºC (faixa de 5–95%, *alta confiança*) {WGI SPM nota de rodapé 29}.

[93] Com base em reconstruções de 2500 anos, erupções com forçante radiativa mais negativa do que -1Wm-2, relacionadas com o efeito radiativo de aerossóis estratosféricos vulcânicos na literatura avaliada neste relatório, ocorrem em média duas vezes por século. {WGI SPM nota de rodapé 38}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 117

Ártico (*confiança alta*) e nos recifes de corais de águas quentes (*confiança muito alta*) {WGII SPM B.3.1}.

- Chuvas extremas mais intensas e frequentes e enchentes associadas em muitas regiões, incluindo cidades costeiras e outras em áreas baixas (*confiança média a alta*), e aumento da proporção e velocidade de pico dos ventos de ciclones tropicais intensos (*confiança alta*) {WGI SPM B.2.4, WGI SPM C.2.2, WGI SPM C.2.6, WGI Capítulo 11.7}.

- Elevados riscos de escassez de água em terras secas, danos por incêndios e degradação de permafrost (*confiança média*) {SRCCL SPM A.5.3.}.

- Contínua elevação do nível do mar e aumento da frequência e magnitude dos eventos extremos do nível do mar que invadem os assentamentos humanos costeiros e prejudicam a infraestrutura costeira (*alta confiança*), submetendo os ecossistemas costeiros em áreas baixas à submersão e perda (*confiança média*), expandindo a salinização da terra (*confiança muito alta*), com riscos em cascata para a subsistência, saúde, bem-estar, valores culturais, segurança alimentar e da água (*alta confiança*) (Figura 3.4, 4.3). {WGI SPM C.2.5, WGI SPM C.2.6; WGII SPM B.3.1, WGII SPM B.5.2; SRCCL SPM A.5.6; SROCC SPM B.3.4, SROCC SPM 3.6, SROCC SPM B.9.1}.

- A mudança do clima aumentará significativamente problemas de saúde e as mortes prematuras no curto a longo prazo (*alta confiança*). O aquecimento adicional aumentará os riscos de doenças transmitidas por alimentos, água e vetores (*alta confiança*) e os desafios de saúde mental, incluindo ansiedade e estresse (*confiança muito alta*). {WGII SPM B.4.4}

- As mudanças relacionadas à criosfera em inundações, deslizamentos de terra e disponibilidade de água têm o potencial de levar a graves consequências para as pessoas, a infraestrutura e a economia na maioria das regiões montanhosas (*alta confiança*). {WGII TS C.4.2}

- O aumento projetado na frequência e intensidade de precipitações fortes (*alta confiança*) aumentarão as enchentes locais geradas pela chuva (confiança média). {WGI Figura SPM.6; WGI SPM B.2.2; WGII TS C.4.5}

Os múltiplos riscos da mudança do clima se agravarão cada vez mais e com eventos compostos e em cascata a curto prazo (*alta confiança*). Muitas regiões vivenciarão aumento na probabilidade de eventos compostos com maior aquecimento global (*alta confiança*), incluindo ondas de calor e secas simultâneas. Os riscos à saúde e à produção de alimentos serão agravados pela interação de perdas repentinas de produção de alimentos devido ao calor e à seca, exacerbados pelas perdas de produtividade do trabalho induzidas pelo calor (*alta confiança*) (Figura 4.3). Esses impactos interativos aumentarão os preços dos alimentos, reduzirão a renda familiar e levarão a riscos à saúde de desnutrição e mortalidade relacionada ao clima, com nenhum ou baixos níveis de adaptação, especialmente em regiões tropicais (*alta confiança*). Riscos simultâneos e em cascata da mudança do clima aos sistemas alimentares, assentamentos humanos, infraestrutura e saúde tornarão esses riscos mais severos e mais difíceis de gerenciar, inclusive quando interagindo com fatores de risco não climáticos, como a competição por terras entre expansão urbana e produção de alimentos, e pandemias (*alta confiança*). A perda de ecossistemas e seus serviços tem impactos em cascata e a longo prazo sobre as pessoas em todo o mundo, especialmente para os Povos Indígenas e comunidades locais que dependem diretamente dos ecossistemas, para atender às necessidades básicas (*alta confiança*).

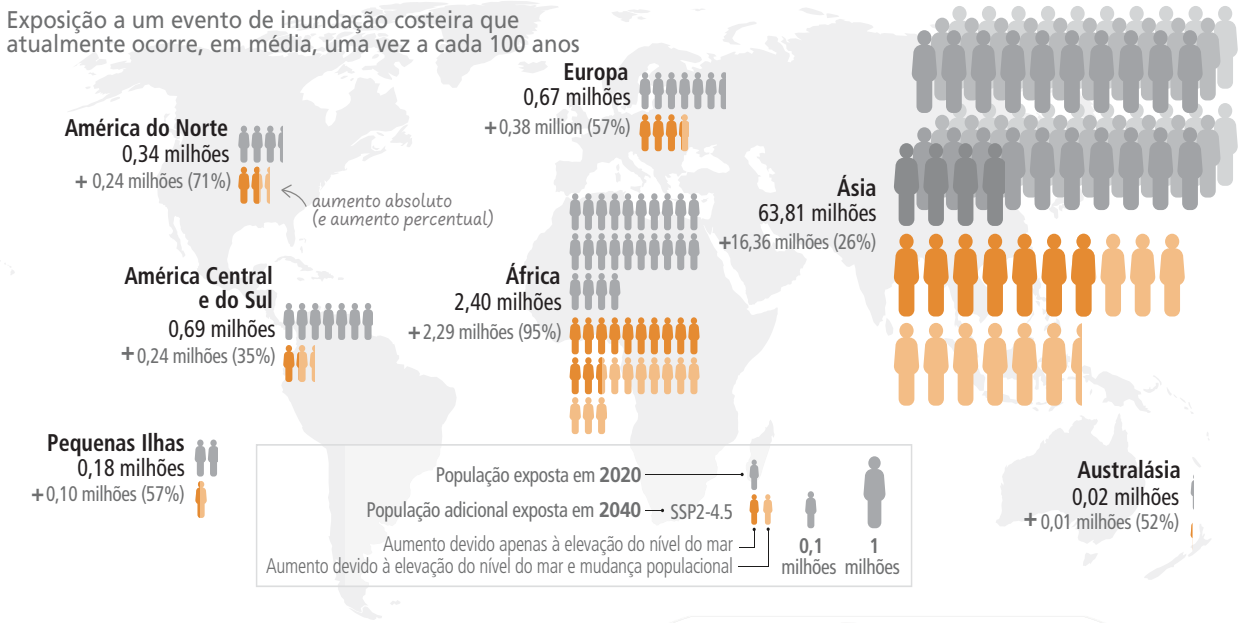
Os crescentes riscos transfronteiriços são projetados nos setores de alimentos, energia e água à medida que os impactos dos extremos climáticos e meteorológicos se propagam através das cadeias de abastecimento, mercados e fluxos de recursos naturais (*alta confiança*) e podem interagir com os impactos de outras crises, tais como pandemias. Os riscos também surgem de algumas respostas destinadas a reduzir os riscos da mudança do clima, incluindo os riscos de má adaptação e efeitos colaterais adversos de algumas medidas de redução de emissões e remoção de dióxido de carbono, como o florestamento de terras naturalmente não florestadas ou a implementação deficiente de bioenergia, que comporta riscos relacionados ao clima para a biodiversidade, segurança alimentar e da água, e meios de subsistência (*alta confiança*). (consulte Seção 3.4.1 e 4.5) {WGI SPM.2.7; WGII SPM B.2.1, WGII SPM B.5, WGII SPM B.5.1, WGII SPM B.5.2, WGII SPM B.5.3, WGII SPM B.5.4, WGII Caixa de Capítulo Transversal COVID no Capítulo 7; WGIII SPM C.11.2; SRCCL SPM A.5, SRCCL SPM A.6.5} (Figura 4.3)

Com cada incremento do aquecimento global, as perdas e danos aumentarão (*confiança muito alta*), tornar-se-ão cada vez mais difíceis de evitar e serão fortemente concentrados entre as populações vulneráveis mais pobres (*alta confiança*). A adaptação não impede todas as perdas e danos, mesmo com uma adaptação efetiva e antes de atingir limites flexíveis e rígidos. As perdas e danos serão desigualmente distribuídos entre sistemas, regiões e setores e não são tratados de forma abrangente pelos atuais arranjos financeiros, de governança e institucionais, particularmente em países vulneráveis em desenvolvimento. *(alta confiança).* {WGII SPM B.4, WGII SPM C.3, WGII SPM C.3.5}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 118

Cada região enfrenta riscos climáticos mais severos e/ou frequentes, compostos e em cascata

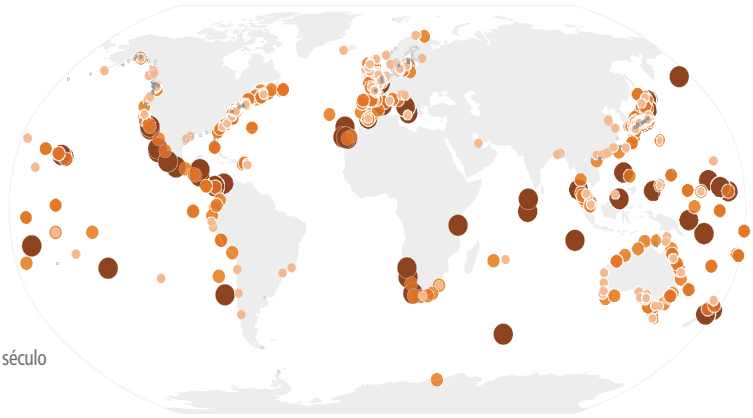
a) Aumento da população exposta à elevação do nível do mar de 2020 a 2040



b) Aumento da frequência de eventos extremos de nível do mar até 2040

Frequência de eventos que ocorrem atualmente, em média, uma vez a cada 100 anos

A ausência de um círculo indica incapacidade de realizar uma avaliação devido à falta de dados.





c) Exemplo de risco complexo, onde os impactos de eventos climáticos extremos têm efeitos em cascata sobre os alimentos, a nutrição, a subsistência e o bem-estar dos pequenos agricultores

Os múltiplos riscos da mudança do clima se agravarão cada vez mais com eventos compostos e em cascata no curto prazo



Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 119

Figura 4.3: Cada região enfrenta riscos climáticos compostos e/ou em cascata mais severos ou frequentes a curto prazo. As mudanças no risco resultam de mudanças no grau de risco, na população exposta e no grau de vulnerabilidade das pessoas, ativos ou ecossistemas. **Painel (a)** As inundações costeiras afetam muitas das regiões altamente populosas do mundo onde grandes porcentagens da população estão expostas. O painel mostra o aumento projetado a curto prazo da população exposta a eventos de inundação de 100 anos retratado como o aumento do ano 2020 a 2040 (devido à elevação do nível do mar e à mudança populacional), com base no cenário intermediário de emissões de GEE (SSP2-4.5) e nas medidas de adaptação atuais.
A migração para fora das áreas costeiras devido à futura elevação do nível do mar não é considerada no cenário. **Painel (b)** probabilidade média projetada no ano 2040 para níveis de água extremos resultantes de uma combinação de elevação média do nível do mar, marés e tempestades, que têm uma probabilidade média anual histórica de 1%. Um método de pico acima do limite (99,7%) foi aplicado às observações históricas de marégrafo disponíveis no banco de dados da Global Extreme Sea Level Analysis versão 2, que é a mesma informação do WGI Figura 9.32, exceto que aqui o painel usa projeções relativas do nível do mar segundo SSP2-4.5 para o ano 2040 ao invés de 2050. A ausência de um círculo indica uma incapacidade de realizar uma avaliação devido à falta de dados, mas não indica a ausência de frequências crescentes.
Painel (c) Os perigos climáticos podem iniciar cascatas de risco que afetam múltiplos setores e se propagam pelas regiões seguindo complexas conexões naturais e sociais. Este exemplo de um evento composto de onda de calor e de seca atingindo uma região agrícola mostra como múltiplos riscos estão interligados e levam a impactos biofísicos, econômicos e sociais em cascata, mesmo em regiões distantes, com grupos vulneráveis como pequenos agricultores, crianças e mulheres grávidas particularmente impactados. {WGI Figura 9.32; WGII SPM B4.3, WGII SPM B1.3, WGII SPM B.5.1, WGII TS Figura TS.9, WGII TS Figura TS.10 (c), WGII Figura 5.2, WGII TS.B.2.3, WGII TS.B.2.3, WGII TS.B.3.3, WGII TS.B.3.3, WGII 9.11.1.2}

4.4 Equidade e Inclusão na Ação de Mudança do Clima

Ações que priorizam a equidade, justiça climática, justiça social e inclusão levam a resultados mais sustentáveis, cobenefícios, reduzem trade-offs, apoiam mudanças transformadoras e avançam no desenvolvimento resiliente do clima. As respostas de adaptação são imediatamente necessárias para reduzir os crescentes riscos climáticos, especialmente para os mais vulneráveis. Equidade, inclusão e transições justas são a chave para o progresso da adaptação e de ambições da sociedade mais profundas para a mitigação acelerada. (alta confiança)

Ações de adaptação e mitigação, entre escalas, setores e regiões, que priorizam a equidade, justiça climática, abordagens baseadas em direitos, justiça social e inclusão, levam a resultados mais sustentáveis, reduzem *trade-offs*, apoiam mudanças transformadoras e promovem o desenvolvimento resiliente ao clima (*alta confiança*). Políticas redistributivas entre setores e regiões que protegem os pobres e vulneráveis, redes de segurança social, equidade, inclusão e transições justas, em todas as escalas, podem permitir ambições sociais mais profundas e resolver *trade-offs* com os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), particularmente educação, fome, pobreza, gênero e acesso à energia (*alta confiança*). Os esforços de mitigação embutidos no contexto mais amplo de desenvolvimento podem aumentar o ritmo, a profundidade e a amplitude das reduções de emissões (*confiança média*). Equidade, inclusão e transições justas em todas as escalas permitem ambições mais profundas da sociedade para uma mitigação acelerada e uma ação climática mais ampla (*alta confiança*). A complexidade do risco de aumento dos preços dos alimentos, redução da renda familiar e desnutrição relacionada à saúde e ao clima (particularmente desnutrição materna e subnutrição infantil) e mortalidade aumenta com poucos ou baixos níveis de adaptação (*alta confiança*). {WGII SPM B.5.1, WGII SPM C.2.9, WGII SPM D.2.1, WGII TS Caixa TS.4; WGIII SPM D.3, WGIII SPM D.3.3, WGIII SPM WGIII SPM E.3, SR1.5 SPM D.4.5} (Figura 4.3c)

Regiões e pessoas com limitações de desenvolvimento consideráveis têm alta vulnerabilidade a ameaças climáticas. Os resultados da adaptação para os mais vulneráveis dentro e entre países e regiões são melhorados através de abordagens centradas na equidade, inclusão e abordagens baseadas em direitos, incluindo 3,3 a 3,6 bilhões de pessoas vivendo em contextos altamente vulneráveis à mudança do clima (*alta confiança*). A vulnerabilidade é maior em locais com pobreza, desafios de governança e acesso limitado a serviços e recursos básicos, conflitos violentos e altos níveis de subsistência sensíveis ao clima (por exemplo, pequenos agricultores, pecuaristas, comunidades pesqueiras) (*alta confiança*). Vários riscos podem ser moderados com a adaptação (*alta confiança*). As maiores lacunas de adaptação existem entre os grupos populacionais de menor renda (*alta confiança*) e o progresso da adaptação é distribuído de forma desigual com as lacunas de adaptação observadas (*alta confiança*). Os atuais desafios de desenvolvimento que causam alta vulnerabilidade são influenciados por padrões históricos e contínuos de desigualdade como o colonialismo, especialmente para muitos Povos Indígenas e comunidades locais (*alta confiança*). A vulnerabilidade é exacerbada pela desigualdade e marginalização ligada ao gênero, etnia, baixa renda ou combinações delas, especialmente para muitos Povos Indígenas e comunidades locais (*alta confiança*). {WGII SPM B.2, WGII SPM B.2.4, WGII SPM B.3.2, WGII SPM B.3.3, WGII SPM C.1, WGII SPM C.1.2, WGII SPM C.2.9}

A participação significativa e o planejamento inclusivo, informado por valores culturais, Conhecimento Índigena, conhecimento local e conhecimento científico podem ajudar a equacionar as lacunas de adaptação e evitar a má adaptação (*alta confiança*). Tais ações com trajetórias flexíveis podem encorajar ações oportunas e de baixo arrependimento (*confiança muito alta*). A integração da adaptação climática em programas de proteção social, incluindo transferências de dinheiro e programas de obras públicas, aumentaria a resiliência à mudança do clima, especialmente quando apoiada por serviços básicos e infraestrutura (*alta confiança*). {WGII SPM C.2.3, WGII SPM C.4.3, WGII SPM C.4.4, WGII SPM C.2.9, WGII WPM D.3}

Equidade, inclusão, transições justas, participação ampla e significativa de todos os atores relevantes na tomada de decisões em todas as escalas permitem ambições mais profundas da sociedade para uma mitigação acelerada, e ações climáticas mais amplas, e construir confiança social, apoiar mudanças transformadoras e um compartilhamento equitativo de benefícios e fardos (*alta confiança*). A equidade continua sendo um elemento central no regime climático da ONU, não obstante as mudanças na diferenciação entre os Estados ao longo do tempo e os desafios na avaliação de ações justas. Trajetórias ambiciosas de mitigação implicam em mudanças grandes e às vezes disruptivas na estrutura econômica, com consequências distributivas significativas, dentro e entre países, incluindo a mudança de renda e emprego durante a transição de atividades de altas para baixas emissões (*alta confiança*). Embora alguns empregos possam ser perdidos, o desenvolvimento com baixas emissões também pode abrir oportunidades para melhorar as habilidades e criar empregos (*alta confiança*). A ampliação do acesso equitativo ao financiamento, tecnologias e governança que facilitem a mitigação e a consideração da

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 120

justiça climática pode ajudar na partilha equitativa de benefícios e fardos, especialmente para países e comunidades vulneráveis. {WGIII SPM D.3, WGIII SPM D.3.2, WGIII SPM D.3.3, WGIII SPM D.3.4, WGIII TS Caixa TS.4}

As prioridades de desenvolvimento entre os países também refletem diferentes pontos de partida e contextos e, portanto, as condições para a reorientação das trajetórias de desenvolvimento em direção a uma maior sustentabilidade serão diferentes, dando origem a diferentes necessidades (*alta confiança*). A implementação de princípios de transição justa através de processos decisórios coletivos e participativos é uma maneira eficaz de integrar princípios de equidade em políticas em todas as escalas, dependendo das circunstâncias nacionais, enquanto em vários países foram estabelecidas apenas comissões de transição, grupos de trabalho e políticas nacionais (*confiança média*). {WGIII SPM D.3.1, WGIII SPM D.3.3}

Muitos instrumentos econômicos e regulatórios têm sido eficazes na redução de emissões e a experiência prática tem informado a concepção de instrumentos para melhorá-los, ao mesmo tempo em que abordam objetivos de distribuição e aceitação social (*alta confiança*). A concepção de intervenções comportamentais, incluindo a forma como as escolhas são apresentadas aos consumidores trabalham sinergicamente com os sinais de preço, tornando a combinação mais eficaz (*confiança média*). Os indivíduos com alto *status* socioeconômico contribuem desproporcionalmente para as emissões e têm o maior potencial de redução de emissões, por exemplo, como cidadãos, investidores, consumidores, modelos e profissionais (*alta confiança*). Há opções sobre a concepção de instrumentos como impostos, subsídios, preços e abordagens baseadas no consumo, complementadas por instrumentos regulatórios para reduzir o consumo de altas emissões e, ao mesmo tempo, melhorar a equidade e o bem-estar da sociedade (*alta confiança*). Mudanças de comportamento e estilo de vida para ajudar os usuários finais a adotar opções de baixo consumo de GEE podem ser apoiadas por políticas, infraestrutura e tecnologia com múltiplos cobenefícios para o bem-estar social (*alta confiança*). A ampliação do acesso equitativo ao financiamento nacional e internacional, tecnologias e capacidade também pode atuar como catalisador para acelerar a mitigação e reorientar as trajetórias de desenvolvimento em contextos de baixa renda (*alta confiança*). A erradicação da pobreza extrema, a pobreza energética e o fornecimento de padrões de vida dignos para todos nessas regiões no contexto da realização de objetivos de desenvolvimento sustentável, a curto prazo, podem ser alcançados sem um crescimento significativo das emissões globais (*alta confiança*). O desenvolvimento de tecnologia, transferência, capacitação e financiamento podem apoiar os países/regiões em desenvolvimento a dar um salto ou fazer uma transição para sistemas de transporte de baixas emissões, proporcionando assim múltiplos cobenefícios (*alta confiança*). O desenvolvimento resiliente ao clima é avançado quando os atores trabalham de forma equitativa, justa e possibilitando maneiras de conciliar interesses, valores e visões de mundo divergentes, em direção a resultados equitativos e justos (*alta confiança*) {WGII D.2.1, WGIII SPM B.3.3, WGIII SPM.C.8.5, WGIII SPM C.10.2, WGIII SPM C.10.4, WGIII SPM D.3.4, WGIII SPM E.4.2, WGIII TS.5.1, WGIII Capítulo 5.4, WGIII Capítulo 5.8, WGIII Capítulo 15.2}

4.5 Ações de Mitigação e Adaptação no Curto Prazo

Transições rápidas e de longo alcance em todos os setores e sistemas são necessárias para alcançar reduções de emissões profundas e sustentadas e garantir um futuro viável e sustentável para todos. Estas transições do sistema envolvem um aumento significativo de um amplo portfólio de opções de mitigação e adaptação. Opções viáveis, eficazes e de baixo custo para mitigação e adaptação já estão disponíveis, com diferenças entre sistemas e regiões. *(alta confiança)*

Transições rápidas e de longo alcance em todos os setores e sistemas são necessárias para alcançar reduções de emissões profundas e assegurar um futuro viável e sustentável para todos (*alta confiança*). As transições de sistema[94] consistentes com as trajetórias que limitam o aquecimento a 1,5ºC (>50%) com ou sem *overshoot* limitado ("sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada") são mais rápidas e acentuadas no curto prazo do que naquelas que limitam o aquecimento a 2ºC (>67%) (*alta confiança*). Tal mudança sistêmica é sem precedentes em termos de escala, mas não necessariamente em termos de velocidade (*confiança média*). As transições do sistema tornam possível a adaptação transformadora necessária para altos níveis de saúde e bem-estar humano, resiliência econômica e social, saúde do ecossistema e saúde planetária. {WGII SPM A, WGII SPM Figura SPM.1; WGIII SPM C.3; SR1.5 SPM C.2, SR1.5 SPM C.2.1, SR1.5 SPM C.2, SR1.5 SPM C.5}
Opções viáveis, eficazes e de baixo custo para mitigação e adaptação já estão disponíveis (*alta confiança*) (Figura 4.4). As opções de mitigação que custam US$100 por tCO_2e ou menos poderiam reduzir as emissões globais de GEE em pelo menos metade do nível de 2019 até 2030 (as opções que custam menos de US$20 por tCO_2e são estimadas em mais da metade deste potencial) (*alta confiança*) (Figura 4.4). A disponibilidade, viabilidade[95] e potencial de mitigação ou eficácia das opções de adaptação a curto prazo diferem entre sistemas e regiões (*confiança muito alta*). {WGII SPM C.2; WGIII SPM C.12, WGIII SPM E.1.1; SR1.5 SPM B.6}
Medidas voltadas para a demanda e novas formas de prestação de serviços de uso final podem reduzir as emissões globais de GEE nos setores de uso final em 40–70% até 2050, em comparação com os cenários base, enquanto algumas regiões e grupos socioeconômicos exigem energia e recursos adicionais. A mitigação voltada para a demanda abrange mudanças no uso da infraestrutura, adoção de tecnologia de uso final e mudanças socioculturais e comportamentais. (*alta confiança*) (Figura 4.4) {WGIII SPM C.10}

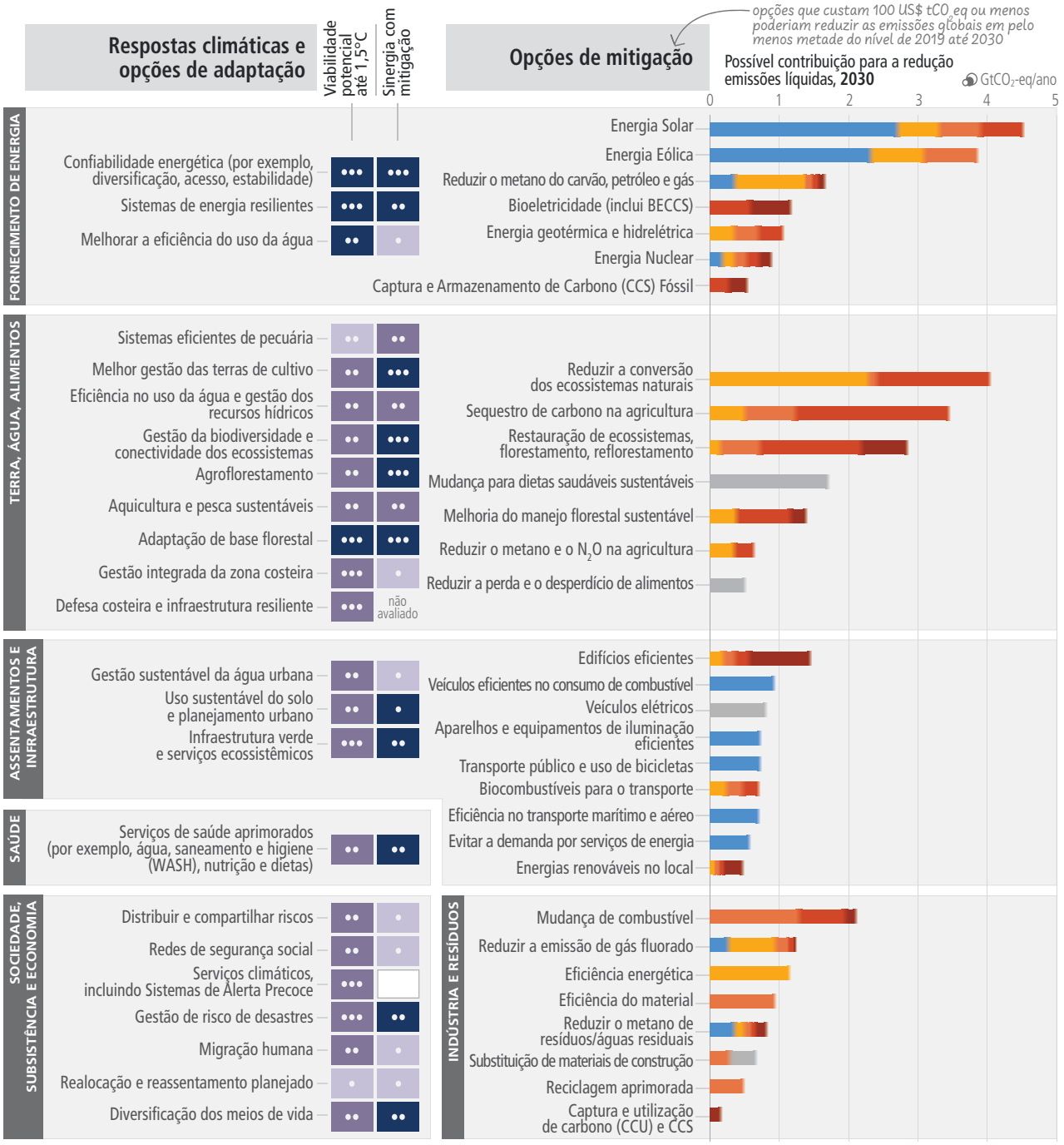
[94] As transições de sistemas envolvem um amplo portfólio de opções de mitigação e adaptação que permitem reduções profundas de emissões e adaptação transformadora em todos os setores. Este relatório tem um foco especial nas seguintes transições do sistema: energia; indústria; cidades, assentamentos e infraestrutura; terra, oceano, alimentos e água; saúde e nutrição; e sociedade, subsistência e economias {WGII SPM A., WGII SPM Figura SPM.1, WGII SPM Figura SPM.4; SR1.5 SPM C.2,}

[95] Consulte o Anexo I: Glossário.

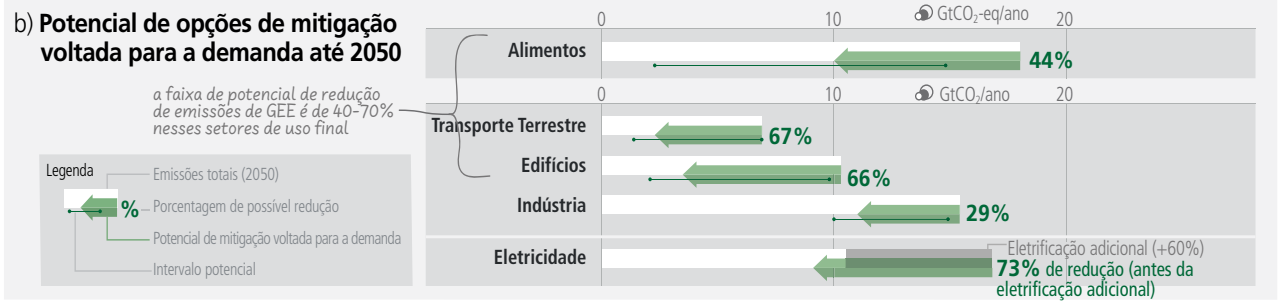
Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 121

Múltiplas oportunidades para ampliar a ação climática.

a) Viabilidade das respostas climáticas e adaptação, e potencial de opções de mitigação no curto prazo



b) Potencial de opções de mitigação voltada para a demanda até 2050



Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 122

Figura 4.4: Múltiplas oportunidades para ampliar a ação climática. Painel (a) apresenta opções selecionadas de mitigação e adaptação por diferentes sistemas. O lado esquerdo do painel (a) mostra respostas climáticas e opções de adaptação avaliadas por sua viabilidade multidimensional em escala global, no curto prazo e até 1,5ºC de aquecimento global. Como a literatura acima de 1,5ºC é limitada, a viabilidade em níveis mais altos de aquecimento pode mudar, o que atualmente não é possível avaliar de forma robusta. O termo resposta é usado aqui além de adaptação porque algumas respostas, tais como migração, realocação e reassentamento, podem ou não ser consideradas adaptação. A migração, quando voluntária, segura e ordenada, permite a redução dos riscos aos fatores de estresse climáticos e não climáticos. A adaptação de base florestal inclui manejo florestal sustentável, conservação e restauração florestal, reflorestamento e florestamento. WASH refere-se à água, saneamento e higiene. Seis dimensões de viabilidade (econômica, tecnológica, institucional, social, ambiental e geofísica) foram utilizadas para calcular a viabilidade potencial das respostas climáticas e opções de adaptação, juntamente com suas sinergias com a mitigação. Para potenciais de viabilidade e dimensões de viabilidade, a figura mostra a viabilidade alta, média ou baixa. As sinergias com a mitigação são identificadas como altas, médias e baixas. O lado direito do painel (a) fornece uma visão geral das opções de mitigação selecionadas e seus custos e potenciais estimados em 2030. Os potenciais e custos relativos variam conforme o lugar, contexto e tempo e a longo prazo, em comparação com 2030. Os custos são os custos monetários líquidos descontados durante toda a vida útil das emissões de gases de efeito estufa evitadas, calculados em relação a uma tecnologia de referência. O potencial (eixo horizontal) é a quantidade de redução líquida de emissão de GEE que pode ser alcançada por uma dada opção de mitigação em relação a uma base de emissão específica. As reduções líquidas de emissões de GEE são a soma de emissões reduzidas e/ou sumidouros melhorados. A base utilizada consiste em cenários de referência da política atual (por volta de 2019) do banco de dados de cenários do AR6 (valores do percentual 25/75). Os potenciais de mitigação são avaliados independentemente para cada opção e não são necessariamente aditivos. As opções de mitigação do sistema de saúde estão incluídas principalmente em assentamentos e infraestrutura (por exemplo, edifícios eficientes de saúde) e não podem ser identificadas separadamente. A mudança de combustível na indústria refere-se à mudança para eletricidade, hidrogênio, bioenergia e gás natural. O comprimento das barras sólidas representa o potencial de mitigação de uma opção. Os potenciais são divididos em categorias de custo, indicadas por cores diferentes (consulte legenda). Somente os custos monetários com desconto vitalício são considerados. Quando uma transição gradual de cores é mostrada, a divisão do potencial em categorias de custo não é bem conhecida ou depende muito de fatores como localização geográfica, disponibilidade de recursos e circunstâncias regionais, e as cores indicam a gama de estimativas. A incerteza no potencial total é tipicamente de 25–50%. Ao interpretar esta figura, deve-se considerar o seguinte: (1) O potencial de mitigação é incerto, pois dependerá do deslocamento da tecnologia de referência (e das emissões), da taxa de adoção de novas tecnologias e de vários outros fatores; (2) Opções diferentes têm diferentes facetas além dos aspectos de custo, que não estão refletidas na figura; e (3) Custos para acomodar a integração de fontes variáveis de energia renovável em sistemas elétricos devem ser modestos até 2030, e não estão incluídos.

O **Painel (b)** exibe o potencial indicativo das opções de mitigação da demanda para 2050. Os potenciais são estimados com base em aproximadamente 500 estudos *bottom-up* que representam todas as regiões globais. A base (barra branca) é fornecida pela média setorial de emissões de GEE em 2050 dos dois cenários (IEA-STEPS (Agência Internacional de Energia-Cenário de Políticas Declaradas) e IP_ModAct (Trajetória Ilustrativa Ação Moderada)) consistente com as políticas anunciadas pelos governos nacionais até 2020. A seta verde representa o potencial de redução de emissões voltadas para a demanda. A gama em potencial é mostrada por uma linha de pontos de conexão que exibe o maior e o menor potencial relatado na literatura. Os alimentos mostram o potencial do lado da demanda de fatores socioculturais e do uso da infraestrutura, e mudanças nos padrões de uso da terra possibilitadas pela mudança na demanda de alimentos. Medidas voltadas para a demanda e novas formas de prestação de serviços de uso final podem reduzir as emissões globais de GEE nos setores de uso final (edifícios, transporte terrestre, alimentos) em 40–70% até 2050, em comparação com os cenários base, enquanto algumas regiões e grupos socioeconômicos exigem energia e recursos adicionais. A última linha mostra como as opções de mitigação da demanda em outros setores podem influenciar a demanda geral de eletricidade. A barra cinza escura mostra o aumento projetado na demanda de eletricidade acima da base de 2050 devido à crescente eletrificação nos outros setores. Com base em uma avaliação *bottom-up*, este aumento projetado na demanda de eletricidade pode ser evitado mediante opções de mitigação da demanda nos domínios do uso de infraestrutura e fatores socioculturais que influenciam o uso de eletricidade na indústria, transporte terrestre e edifícios (flecha verde).

{WGII SPM Figura SPM 4, WGII Caixa de Capítulo Transversal FEASIB no Capítulo 18; WGIII SPM C.10, WGIII Capítulo 12.2.1, WGIII Capítulo 12.2.2, WGIII Figura SPM 6, WGIII SPM Figura SPM 7}

4.5.1. Sistemas de Energia

Reduções rápidas e profundas nas emissões de GEE exigem transições significativas do sistema energético (*alta confiança*). As opções de adaptação podem ajudar a reduzir os riscos relacionados ao clima para o sistema energético (*confiança muito alta*). Os sistemas energéticos de emissões líquidas zero de CO_2 implicam: uma redução substancial no uso geral de combustíveis fósseis, uso mínimo de combustíveis fósseis sem abatimento[96], e uso de Captura e Armazenamento de Carbono nos sistemas de combustíveis fósseis remanescentes; sistemas elétricos sem emissão líquida de CO_2; eletrificação generalizada; fontes de energia alternativa em aplicações menos suscetíveis à eletrificação; conservação e eficiência energética; e maior integração em todo o sistema energético (*alta confiança*). Grandes contribuições para a redução de emissões podem vir de opções que custam menos de US$20 tCO_2e^{-1}, incluindo energia solar e eólica, melhorias na eficiência energética e reduções de emissões de CH_4 (metano) (da mineração de carvão, petróleo e gás e resíduos) (*confiança média*).[97] Muitas dessas opções de resposta são tecnicamente viáveis e apoiadas pelo público (*alta confiança*). A manutenção de sistemas de emissão intensiva pode, em algumas regiões e setores, ser mais cara do que a transição para sistemas de baixa emissão (*alta confiança*) {WGII SPM C.2.10; WGIII SPM C.4.1, WGIII SPM C.4.2, WGIII SPM C.12.1, WGIII SPM E.1.1, WGIII TS.5.1}.

A mudança do clima e eventos extremos relacionados afetarão os futuros sistemas energéticos, incluindo a produção de energia hidrelétrica, o rendimento da bioenergia, a eficiência das usinas térmicas e as demandas de aquecimento e resfriamento (*alta confiança*). As opções de adaptação de sistemas de energia mais viáveis suportam a resiliência da infraestrutura, sistemas de energia confiáveis e uso eficiente da água para sistemas de geração de energia existentes e novos (*confiança muito alta*). As adaptações para geração de energia hidrelétrica e termoelétrica são eficazes na maioria das regiões de até 1,5ºC a 2ºC, com eficácia decrescente em níveis mais altos de aquecimento (*confiança média*). A diversificação da geração de energia (por exemplo, eólica, solar, hidroelétrica em pequena escala) e a gestão da demanda (por exemplo, armazenamento e melhorias na eficiência

[96] Neste contexto, "combustíveis fósseis sem abatimento" refere-se aos combustíveis fósseis produzidos e utilizados sem intervenções que reduzem substancialmente a quantidade de GEE emitida ao longo do ciclo de vida; por exemplo, capturando 90% ou mais de CO_2 de usinas elétricas, ou 50–80% de emissões fugitivas de metano do fornecimento de energia {WGIII SPM nota de rodapé 54}.

[97] Os potenciais de mitigação e os custos de mitigação de tecnologias individuais em um contexto ou região específica podem diferir muito das estimativas fornecidas (confiança média) {WGIII SPM C.12.1}.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 123

energética) podem aumentar a confiabilidade energética e reduzir as vulnerabilidades à mudança do clima, especialmente nas populações rurais (*alta confiança*). Mercados de energia sensíveis ao clima, padrões de projeto atualizados sobre ativos energéticos conforme a mudança do clima atual e projetada, tecnologias de redes inteligentes, sistemas de transmissão robustos e maior capacidade de resposta a déficits de fornecimento têm alta viabilidade a médio e longo prazo, com cobenefícios de mitigação (*confiança muito alta*). {WGII SPM B.5.3, WGII SPM C.2.10; WGIII TS.5.1}

4.5.2. Indústria

Há várias opções para reduzir as emissões industriais que diferem por tipo de indústria; muitas indústrias são afetadas pela mudança do clima, especialmente por eventos extremos (*alta confiança*). A redução das emissões da indústria implicará uma ação coordenada em todas as cadeias de valor para promover todas as opções de mitigação, incluindo gestão da demanda, eficiência energética e de materiais, fluxos circulares de materiais, bem como tecnologias de abatimento e mudanças transformacionais nos processos de produção (*alta confiança*). A indústria leve e a fabricação podem ser amplamente descarbonizadas através das tecnologias de redução disponíveis (por exemplo, eficiência do material, circularidade), eletrificação (por exemplo, aquecimento eletrotérmico, bombas de calor), e mudança para combustíveis com baixas e zero emissões de GEE (por exemplo, hidrogênio, amoníaco, bio e outros combustíveis sintéticos) (*alta confiança*), enquanto a redução profunda das emissões do processo de cimento dependerá da substituição do material cimentício e da disponibilidade de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) até que novos produtos químicos sejam dominados *(alta confiança*). A redução das emissões da produção e uso de produtos químicos precisaria contar com uma abordagem de ciclo de vida, incluindo maior reciclagem de plásticos, troca de combustível e matéria-prima, e carbono proveniente de fontes biogênicas, e, dependendo da disponibilidade, Captura e Utilização de Carbono (CCU), captura direta de CO_2 no ar, bem como CCS (*alta confiança*). As ações para reduzir as emissões do setor industrial podem mudar a localização das indústrias intensivas em GEE e a organização das cadeias de valor, com efeitos distributivos sobre o emprego e a estrutura econômica (*confiança média*). {WGII TS.B.9.1, WGII Capítulo 16.5.2 WGIII SPM C.5, WGIII SPM C.5.2, WGIII SPM C.5.3, WGIII TS.5.5}

Muitos setores industriais e de serviços são afetados negativamente pela mudança do clima por meio de disrupções no fornecimento e nas operações, especialmente por eventos extremos (*alta confiança*), e exigirão esforços de adaptação. As indústrias de uso intensivo de água (por exemplo, mineração) podem tomar medidas para reduzir o estresse hídrico, como reciclagem e reutilização da água, utilizando fontes salobras ou salinas, trabalhando para melhorar a eficiência do uso da água. Entretanto, os riscos residuais permanecerão, especialmente em níveis mais altos de aquecimento (*confiança média*). (Seção 3.2) {WGII TS.B.9.1, WGII Capítulo 16.5.2, WGII Capítulo 4.6.3}

4.5.3 Cidades, assentamentos e infraestrutura

Sistemas urbanos são críticos para alcançar reduções profundas de emissões e avançar no desenvolvimento resiliente do clima, particularmente quando isso envolve um planejamento integrado que incorpora infraestrutura física, natural e social (*alta confiança*). Profundas reduções de emissões e ações de adaptação integradas são avançadas por: planejamento do uso do solo e tomada de decisões integrados e inclusivos; forma urbana compacta pela colocalização de empregos e moradias; redução ou mudança no consumo de energia e materiais urbanos; eletrificação em combinação com fontes de baixas emissões; melhoria da infraestrutura de gestão de água e resíduos; e aumento da absorção e armazenamento de carbono no ambiente urbano (por exemplo, materiais de construção de base biológica, superfícies permeáveis e infraestrutura urbana verde e azul). As cidades podem atingir emissões líquidas zero se as emissões forem reduzidas dentro e fora de suas fronteiras administrativas por meio de cadeias de fornecimento, criando efeitos benéficos em cascata em outros setores. (*alta confiança*). {WGII SPM C.5.6, WGII SPM D.1.3, WGII SPM D.3; WGIII SPM C.6, WGIII SPM C.6.2, WGIII TS 5.4, SR1.5 SPM C.2.4}

Considerar os impactos e riscos da mudança do clima (por exemplo, através de serviços climáticos) no projeto e planejamento de assentamentos urbanos e rurais e infraestrutura é fundamental para a resiliência e a melhoria do bem-estar humano. A mitigação efetiva pode ser avançada em cada uma das etapas de projeto, construção, retrofit, uso e disposição das edificações. As intervenções de mitigação para edificações incluem: na fase de construção, materiais de construção de baixa emissão, invólucro de construção altamente eficiente e a integração de soluções de energia renovável; na fase de uso, aparelhos/equipamentos altamente eficientes, a otimização do uso de edificações e seu abastecimento com fontes de energia de baixa emissão; e na fase de disposição, reciclagem e reutilização de materiais de construção. As medidas de eficiência[98] podem limitar a demanda de energia e materiais ao longo do ciclo de vida dos edifícios e aparelhos. (*alta confiança*) {WGII SPM C.2.5; WGIII SPM C.7.2}.

As emissões de GEE relacionadas ao transporte podem ser reduzidas pelas opções voltadas para a demanda e por tecnologias de baixas emissões de GEE. Mudanças na forma urbana, realocação de espaço nas ruas para ciclismo e pedestres, digitalização (por exemplo, teletrabalho) e programas que incentivem mudanças no comportamento do consumidor (por exemplo, transporte, preços) podem reduzir a demanda por serviços de transporte e apoiar a mudança para meios de transporte mais eficientes em termos energéticos (*alta confiança*). Os veículos elétricos movidos por eletricidade de baixas emissões oferecem o maior potencial de descarbonização para o transporte terrestre, com base no ciclo de vida (*alta confiança*). Os custos dos veículos eletrificados estão diminuindo e sua adoção está acelerando, mas exigem investimentos contínuos em infraestrutura de apoio para aumentar a escala de implantação (*alta confiança*). A pegada ambiental da produção de baterias e as crescentes preocupações com minerais críticos podem ser abordadas via estratégias de diversificação de materiais e suprimentos, melhorias na eficiência energética e

[98] Um conjunto de medidas e práticas diárias que evitam a demanda de energia, materiais, terra e água enquanto proporcionam bem-estar humano para todos dentro dos limites planetários {WGIII Anexo I}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 124

material, e fluxos circulares de materiais (*confiança média*). Os avanços nas tecnologias de baterias poderiam facilitar a eletrificação de caminhões pesados e complementar os sistemas ferroviários elétricos convencionais (*confiança média*). Os biocombustíveis sustentáveis podem oferecer benefícios adicionais de mitigação no transporte terrestre a curto e médio prazo (*confiança média*). Biocombustíveis sustentáveis, hidrogênio com baixas emissões e derivados (incluindo combustíveis sintéticos) podem apoiar a mitigação das emissões de CO_2 do transporte marítimo, aéreo e terrestre pesado, mas exigem melhorias no processo de produção e reduções de custos (*confiança média*). Os principais sistemas de infraestrutura, incluindo saneamento, água, saúde, transporte, comunicações e energia, serão cada vez mais vulneráveis se os padrões de projeto não considerarem as mudanças nas condições climáticas (*alta confiança*) {WGII SPM B.2.5; WGIII SPM C.6.2, WGIII SPM C.8, WGIII SPM C.8.1, WGIII SPM C.8.2, WGIII SPM C.10.2, WGIII SPM C.10.3, WGIII SPM C.10.4}.

A infraestrutura verde/natural e azul, como a silvicultura urbana, telhados verdes, lagoas e lagos, e a restauração de rios podem mitigar a mudança do clima através da absorção e armazenamento de carbono, emissões evitadas e redução no uso de energia, reduzindo, ao mesmo tempo, o risco de eventos extremos, como ondas de calor, precipitação pesada e secas, e avançando nos cobenefícios para a saúde, o bem-estar e a subsistência (*confiança média*). A arborização urbana pode proporcionar resfriamento local (*confiança muito alta*). A combinação de respostas de adaptação verde/natural e cinza/física da infraestrutura tem potencial para reduzir os custos de adaptação e contribuir para o controle de enchentes, saneamento, gestão de recursos hídricos, prevenção de deslizamentos de terra e proteção costeira (*confiança média*). Globalmente, mais financiamento é dirigido à infraestrutura cinza/física do que à infraestrutura verde/natural e à infraestrutura social (*confiança média*), e há poucas evidências de investimento em assentamentos informais (*confiança média a alta*). Os maiores ganhos em bem-estar nas áreas urbanas podem ser alcançados priorizando o financiamento para reduzir o risco climático para comunidades de baixa renda e marginalizadas, incluindo pessoas que vivem em assentamentos informais (*alta confiança*). {WGII SPM C.2.5, WGII SPM C.2.6, WGII SPM C.2.7, WGII SPM D.3.2, WGII TS.E.1.4, WGII Caixa de Capítulo Transversal FEAS; WGIII SPM C.6, WGIII SPM C.6.2, WGIII SPM D.1.3, WGIII SPM D.2.1}

As respostas à contínua elevação do nível do mar e subsidência da terra em cidades e povoados costeiros de baixa altitude e pequenas ilhas incluem proteção, acomodação, antecipação e realocação planejada. Estas respostas são mais eficazes se combinadas e/ou sequenciadas, planejadas com bastante antecedência, alinhadas com valores socioculturais e prioridades de desenvolvimento, e sustentadas por processos inclusivos de engajamento comunitário. (*alta confiança*) {WGII SPM C.2.8}

4.5.4. Terra, Oceano, Alimentos e Água

Existe um potencial substancial de mitigação e adaptação das opções na agricultura, silvicultura e outros usos da terra, e nos oceanos, que poderia ser ampliado a curto prazo na maioria das regiões (*alta confiança*) (Figura 4.5). A conservação, melhor gerenciamento e restauração de florestas e outros ecossistemas oferecem a maior parcela do potencial de mitigação econômica, com redução do desmatamento em regiões tropicais com o maior potencial total de mitigação. A restauração do ecossistema, o reflorestamento e o florestamento podem levar a *trade-offs* devido a demandas concorrentes sobre a terra. A minimização de *trade-offs* requer abordagens integradas para atender a múltiplos objetivos, incluindo a segurança alimentar. Medidas voltadas para a demanda (mudança para dietas saudáveis sustentáveis e redução de perdas/resíduos de alimentos) e intensificação agrícola sustentável podem reduzir a conversão de ecossistemas e as emissões de CH_4 e N_2O, e liberar terras para reflorestamento e restauração de ecossistemas. Produtos agrícolas e florestais de fonte sustentável, incluindo produtos de madeira de longa vida, podem ser utilizados em vez de produtos com maior intensidade de GEE em outros setores. As opções efetivas de adaptação incluem melhorias nas cultivares, agroflorestamento, adaptação baseada na comunidade, diversificação agrícola e paisagística e agricultura urbana. Estas opções de resposta de AFOLU requerem a integração de fatores biofísicos, socioeconômicos e outros fatores de capacitação. A eficácia da adaptação baseada em ecossistemas e a maioria das opções de adaptação relacionadas à água diminui com o aumento do aquecimento (consulte 3.2). (*alta confiança*). {WGII SPM C.2.1, WGII SPM C.2.2, WGII SPM C.2.5 WGIII SPM C.9.1; SRCCL SPM B.1.1, SRCCL SPM B.5.4, SRCCL SPM D.1; SROCC SPM C}

Algumas opções, como a conservação de ecossistemas com alto teor de carbono (por exemplo, turfeiras, pântanos, serras, manguezais e florestas), têm impactos imediatos, enquanto outras, como a restauração de ecossistemas com alto teor de carbono, a recuperação de solos degradados ou o florestamento, levam décadas para produzir resultados mensuráveis (*alta confiança*). Muitas tecnologias e práticas de manejo sustentável da terra são financeiramente rentáveis em três a dez anos (*confiança média*). {SRCCL SPM B.1.2, SRCCL SPM D.2.2}

A manutenção da resiliência da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos em escala global depende da conservação efetiva e equitativa de aproximadamente 30–50% da terra, água doce e áreas oceânicas da Terra, incluindo atualmente ecossistemas quase naturais (*alta confiança*). Os serviços e opções oferecidos pelos ecossistemas terrestres, de água doce, costeiros e oceânicos podem ser apoiados por proteção, restauração, gestão preventiva baseada no ecossistema, do uso de recursos renováveis e a redução da poluição e outros fatores de estresse (*alta confiança*). {WGII SPM C.2.4, WGII SPM D.4; SROCC SPM C.2}

A conversão de terras em grande escala para bioenergia, biocarvão ou florestamento pode aumentar os riscos para a biodiversidade, água e segurança alimentar. Em contraste, a restauração de florestas naturais e turfeiras drenadas e a melhoria da sustentabilidade das florestas manejadas aumenta a resiliência dos estoques e sumidouros de carbono e reduz a vulnerabilidade dos ecossistemas à mudança do clima. A cooperação, e a tomada de decisões inclusivas, com as comunidades locais e os Povos Indígenas, bem como o reconhecimento dos direitos inerentes dos Povos Indígenas, é parte integrante da adaptação bem-sucedida através das florestas e outros ecossistemas. (*alta confiança*). {WGII SPM B.5.4, WGII SPM C.2.3, WGII SPM C.2.4; WGIII SPM D.2.3; SRCCL B.7.3, SRCCL SPM C.4.3, SRCCL TS.7}

Os rios naturais, áreas úmidas e florestas a montante reduzem o risco de inundação na maioria das circunstâncias (*alta confiança*). A melhoria

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 125

da retenção natural de água, como a restauração de áreas úmidas e rios, o planejamento do uso do solo, como de zonas sem construção ou o manejo florestal a montante, pode reduzir ainda mais o risco de inundação (*confiança média*). Para inundações internas, combinações de medidas não estruturais como sistemas de alerta precoce e medidas estruturais como diques reduziram a perda de vidas (*confiança média*), mas defesas duras contra inundações ou elevação do nível do mar também podem ser má adaptativas (*alta confiança*). {WGII SPM C.2.1, WGII SPM C.4.1, WGII SPM C.4.2, WGII SPM C.2.5}

A proteção e restauração dos ecossistemas costeiros de "carbono azul" (por exemplo, manguezais, pântanos salgados e prados de ervas marinhas) poderia reduzir as emissões e/ou aumentar a absorção e armazenamento de carbono (*confiança média*). As zonas úmidas costeiras protegem contra a erosão costeira e as inundações (*confiança muito alta*). O reforço das abordagens de precaução, tais como a reconstrução da pesqueiros superexplorados ou esgotados, e a capacidade de resposta das estratégias existentes de gestão da pesca reduzem os impactos negativos da mudança do clima sobre a pesca, com benefícios para as economias regionais e os meios de subsistência (*confiança média*). A gestão baseada em ecossistemas na pesca e aquicultura apoia a segurança alimentar, a biodiversidade, a saúde humana e o bem-estar (*alta confiança*). {WGII SPM C.2.2, WGII SPM C.2; SROCC SPM C2.3, SROCC SPM C.2.4}

4.5.5. Saúde e Nutrição

A saúde humana se beneficiará de opções integradas de mitigação e adaptação que incorporam a saúde nas políticas de alimentos, infraestrutura, proteção social e hídricas (*confiança muito alta*). Dietas saudáveis equilibradas e sustentáveis[99] e redução da perda e desperdício de alimentos apresentam importantes oportunidades de adaptação e mitigação enquanto geram cobenefícios significativos em termos de biodiversidade e saúde humana (*alta confiança*). Políticas de saúde pública para melhorar a nutrição, tais como o aumento da diversidade de fontes de alimentos nas compras públicas, seguros de saúde, incentivos financeiros e campanhas de conscientização, podem potencialmente influenciar a demanda de alimentos, reduzir o desperdício de alimentos, reduzir os custos de saúde, contribuir para a redução das emissões de GEE e aumentar a capacidade de adaptação (*alta confiança*). A melhoria do acesso a fontes e tecnologias de energia limpa e a mudança para mobilidade ativa (por exemplo, caminhadas e ciclismo) e transporte público podem proporcionar benefícios socioeconômicos, de qualidade do ar e de saúde, especialmente para mulheres e crianças (*alta confiança*). {WGII SPM C.2.2, WGII SPM C.2.11, WGII Caixa de Capítulo Transversal SAÚDE; WGIII SPM C.2.2, WGIII SPM C.4.2, WGIII SPM C.9.1, WGIII SPM C.10.4, WGIII SPM D.1.3, WGIII SPM Figura SPM6, WGIII SPM Figura SPM.8; SRCCL SPM B.6.2, SRCCL SPM B.6.3, SRCCL B.4.6, SRCCL SPM C.2.4}

Existem opções eficazes de adaptação para proteger a saúde e o bem-estar humano (*alta confiança*). Os Planos de Ação de Saúde que incluem sistemas de alerta precoce e resposta são eficazes para calor extremo (*alta confiança*). Opções eficazes para doenças transmitidas pela água e por alimentos incluem melhorar o acesso à água potável, reduzir a exposição dos sistemas de água e saneamento a enchentes e eventos climáticos extremos, e melhorar os sistemas de alerta precoce (*confiança muito alta*). Para doenças transmitidas por vetores, as opções de adaptação eficazes incluem vigilância, sistemas de alerta precoce e desenvolvimento de vacinas (*confiança muito alta*). As opções eficazes de adaptação para reduzir os riscos à saúde mental sob a mudança do clima incluem a melhoria da vigilância e do acesso aos cuidados de saúde mental, e o monitoramento dos impactos psicossociais de eventos climáticos extremos (*alta confiança*). Um caminho chave para a resiliência climática no setor da saúde é o acesso universal à saúde (*alta confiança*) {WGII SPM C.2.11, WGII Capítulo 7.4.6}

4.5.6. Sociedade, Meios de Subsistência e Economias

O aumento do conhecimento sobre riscos e opções de adaptação disponíveis promove respostas sociais, e mudanças de comportamento e estilo de vida apoiadas por políticas, infraestrutura e tecnologia podem ajudar a reduzir as emissões globais de GEE (*alta confiança*). A alfabetização climática e as informações fornecidas via serviços climáticos e abordagens comunitárias, incluindo aquelas informadas pelo Conhecimento Indígena e pelo conhecimento local, podem acelerar mudanças de comportamento e planejamento (*alta confiança*). Programas educacionais e de informação, utilizando as artes, modelagem participativa e ciência cidadã podem facilitar a conscientização, aumentar a percepção de risco e influenciar comportamentos (*alta confiança*). A forma como as escolhas são apresentadas pode permitir a adoção de opções socioculturais de baixa intensidade de GEE, tais como mudanças para dietas saudáveis equilibradas e sustentáveis, redução do desperdício de alimentos e mobilidade ativa (*alta confiança*). A rotulagem criteriosa, enquadramento e comunicação de normas sociais pode aumentar o efeito de mandatos, subsídios ou impostos (*confiança média*) {WGII SPM C.5.3, WGII TS.D.10.1; WGIII SPM C.10, WGIII SPM C.10.2, WGIII SPM C.10.3, WGIII SPM E.2.2, WGIII Figura SPM.6, WGIII TS.6.1, 5.4; SR1.5 SPM D.5.6; SROCC SPM C.4}.

Uma gama de opções de adaptação, tais como gestão de risco de desastres, sistemas de alerta precoce, serviços climáticos e abordagens de distribuição e compartilhamento de riscos, têm ampla aplicabilidade em todos os setores e proporcionam maiores benefícios de redução de riscos quando combinados (*alta confiança*). Serviços climáticos voltados para a demanda e inclusivos de diferentes usuários e fornecedores podem melhorar as práticas agrícolas, informar melhor o uso e a eficiência da água e permitir um planejamento resiliente da infraestrutura (*alta confiança*). Integração de políticas que incluem seguro climático e de saúde, proteção social e redes de segurança adaptativas, financiamento contingente e fundos de reserva, e acesso universal a sistemas de alerta precoce combinados com planos de contingência eficazes, podem reduzir a vulnerabilidade e a exposição dos sistemas humanos (*alta confiança*). A integração da adaptação climática em programas de proteção social, incluindo transferências de dinheiro e programas de obras públicas, é altamente viável e aumenta a resiliência à mudança do clima, especialmente quando apoiada por serviços básicos e infraestrutura (*alta confiança*). As redes de segurança social podem construir capacidades adaptativas,

[99] Dietas balanceadas referem-se a dietas que apresentam alimentos à base de plantas, como aquelas baseadas em cereais secundários, legumes, frutas e vegetais, nozes e sementes, e alimentos de origem animal produzidos em sistemas resilientes, sustentáveis e de baixa emissão de GEE, como descrito no SRCCL.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 126

reduzir a vulnerabilidade socioeconômica e reduzir os riscos ligados a ameaças (*evidência robusta, acordo médio*). {WGII SPM C.2.9, WGII SPM C.2.13, WGII Caixa de Capítulo Transversal FEASIB no Capítulo 18; SRCCL SPM C.1.4, SRCCL SPM D.1.2}.

A redução de riscos futuros de migração e deslocamento involuntário devido à mudança do clima é possível por meio de esforços cooperativos internacionais para aumentar a capacidade de adaptação institucional e o desenvolvimento sustentável (***alta confiança***). O aumento da capacidade de adaptação minimiza o risco associado à migração involuntária e à imobilidade e melhora o grau de escolha sob o qual as decisões de migração são tomadas, enquanto as intervenções políticas podem remover barreiras e expandir as alternativas de migração segura, ordenada e regular que permite que as pessoas vulneráveis se adaptem à mudança do clima (*alta confiança*). {WGII SPM C.2.12, WGII TS.D.8.6, WGII Caixa de Capítulo Transversal MIGRATE no Capítulo 7}

A aceleração do compromisso e do cumprimento dos compromissos assumidos pelo setor privado é promovida, por exemplo, através da criação de planos de negócios para a adaptação, responsabilidade e transparência, e monitoramento e avaliação do progresso da adaptação (***confiança média***). As trajetórias integradas para gerenciar os riscos climáticos serão mais adequadas quando as chamadas opções antecipatórias "de baixo arrependimento" forem estabelecidas conjuntamente entre setores de forma oportuna e viável e eficaz em seu contexto local, e quando as dependências históricas e as má adaptações entre setores forem evitadas (*alta confiança*). As ações de adaptação sustentada são reforçadas pela integração da adaptação nos ciclos de planejamento do orçamento institucional e das políticas, planejamento estatutário, estruturas de monitoramento e avaliação e nos esforços de recuperação de eventos de desastre (*alta confiança*). Instrumentos que incorporam a adaptação, tais como estruturas políticas e jurídicas, incentivos comportamentais e instrumentos econômicos que abordam falhas do mercado, tais como divulgação de riscos climáticos, processos inclusivos e deliberativos fortalecem as ações de adaptação por atores públicos e privados (*confiança média*). {WGII SPM C.5.1, WGII SPM C.5.2, WGII TS.D.10.4}

4.6 Cobenefícios da Adaptação e Mitigação para Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

As ações de mitigação e adaptação têm mais sinergias do que trade-offs com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Sinergias e trade-offs dependem do contexto e da escala de implementação. Possíveis trade-offs podem ser compensados ou evitados com políticas adicionais, investimentos e parcerias financeiras. (alta confiança)

Muitas ações de mitigação e adaptação têm múltiplas sinergias com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), mas algumas ações também podem ter *trade-offs*. As sinergias potenciais com os ODS excedem os possíveis *trade-offs*. Sinergias e *trade-offs* são específicos do contexto e dependem de: meios e escala de implementação, interações intra e intersetoriais, cooperação entre países e regiões, sequenciamento, cronograma e rigor das ações, governança e desenho de políticas. A erradicação da pobreza extrema, da pobreza energética e o fornecimento de padrões de vida decentes para todos, consistentes com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável a curto prazo, podem ser alcançados sem um crescimento significativo das emissões globais. (*alta confiança*) (Figura 4.5) {WGII SPM C.2.3, WGII SPM Figura SPM.4b; WGIII SPM B.3.3, WGIII SPM C.9.2, WGIII SPM D.1.2, WGIII SPM D.1.4, WGIII SPM Figura SPM.8}

Várias opções de mitigação e adaptação podem aproveitar sinergias a curto prazo e reduzir *trade-offs* para avançar no desenvolvimento sustentável em sistemas energéticos, urbanos e terrestres (Figura 4.5) (***alta confiança***). Os sistemas de fornecimento de energia limpa têm múltiplos cobenefícios, incluindo melhorias na qualidade do ar e na saúde. Planos de Ação para Saúde contra o Calor que incluem sistemas de alerta precoce e resposta, abordagens que integram a saúde na alimentação, subsistência, proteção social, água e saneamento beneficiam a saúde e o bem-estar.

Existem sinergias potenciais entre os múltiplos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e o uso sustentável do solo e o planejamento urbano com mais espaços verdes, redução da poluição do ar e mitigação no lado da demanda, incluindo mudanças para dietas saudáveis equilibradas e sustentáveis. A eletrificação combinada com energia de baixo GEE, e as mudanças para o transporte público podem melhorar a saúde, o emprego, além de contribuir para a segurança energética e proporcionar equidade. A conservação, proteção e restauração dos ecossistemas terrestres, de água doce, costeiros e oceânicos, juntamente com uma gestão orientada para se adaptar aos impactos inevitáveis da mudança do clima, pode gerar múltiplos benefícios adicionais, tais como produtividade agrícola, segurança alimentar e conservação da biodiversidade. (*alta confiança*). {WGII SPM C.1.1, WGII C.2.4, WGII SPM D.1, WGII SPM Figura SPM.4, WGII Caixa de Capítulo Transversal HEALTH no Capítulo 17, WGII Caixa de Capítulo Transversal FEASIB no Capítulo 18; WGIII SPM C.4.2, WGIII SPM D.1.3, WGIII SPM D.2, WGIII SPM Figura SPM.8; SRCCL SPM B.4.6}

Ao implementar a mitigação e adaptação em conjunto, e considerando os *trade-offs*, múltiplos cobenefícios e sinergias para o bem-estar humano, bem como a saúde planetária e do ecossistema, podem ser alcançados (***alta confiança***). Existe uma forte ligação entre desenvolvimento sustentável, vulnerabilidade e riscos climáticos. As redes de segurança social que apoiam a adaptação à mudança do clima têm fortes cobenefícios com metas de desenvolvimento como educação, redução da pobreza, inclusão de gênero e segurança alimentar. A restauração da terra contribui para a mitigação e adaptação com sinergias por meio de serviços ecossistêmicos aprimorados e com retornos economicamente positivos e cobenefícios para a redução da pobreza e melhoria dos meios de subsistência. Os trade-offs podem ser avaliados e minimizados dando ênfase à capacitação, financiamento, transferência de tecnologia, investimentos; governança, desenvolvimento, considerações específicas de gênero e outras considerações de equidade social com participação significativa dos Povos Indígenas, comunidades locais e populações

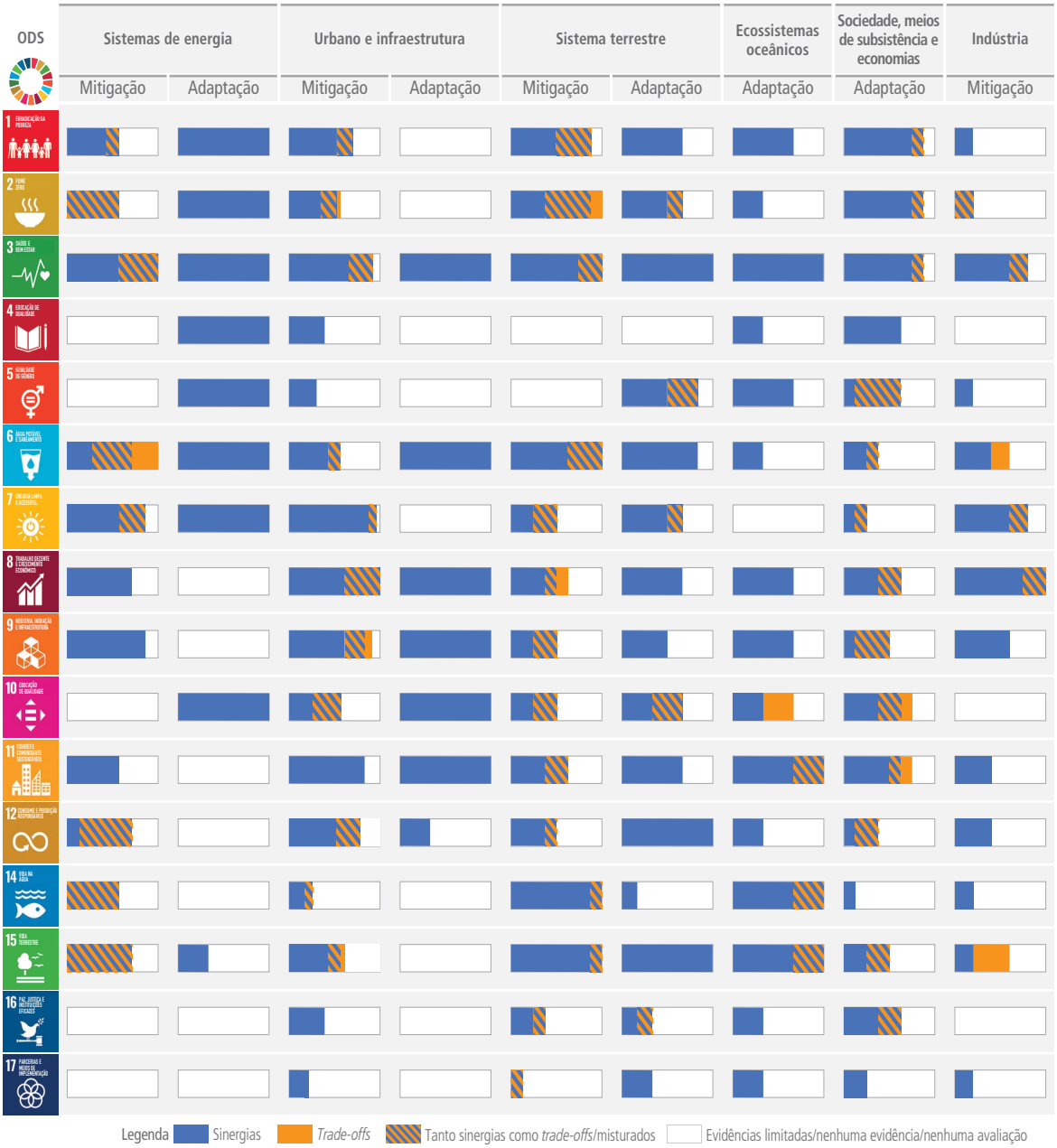
Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 127

vulneráveis. (*alta confiança*). {WGII SPM C.2.9, WGII SPM C.5.6, WGII SPM D.5.2, WGII Caixa de Capítulo Transversal sobre Gênero no Capítulo 18; WGIII SPM C.9.2, WGIII SPM D.1.2, WGIII SPM D.1.4, WGIII SPM D.2; SRCCL SPM D.2.2, SRCCL TS.4}

O projeto e a implementação relevantes para o contexto exigem a consideração das necessidades das pessoas, da biodiversidade e de outras dimensões do desenvolvimento sustentável (*confiança muito alta*). Os países em todos os estágios do desenvolvimento econômico procuram melhorar o bem-estar das pessoas, e suas prioridades de desenvolvimento refletem diferentes pontos de partida e contextos. Os diferentes contextos incluem, entre outros, circunstâncias sociais, econômicas, ambientais, culturais ou políticas, dotação de recursos, capacidades, ambiente internacional e desenvolvimento prévio. Em regiões com alta dependência de combustíveis fósseis para, entre outras coisas, geração de renda e emprego, mitigar os riscos para o desenvolvimento sustentável requer políticas que promovam a diversificação econômica e do setor energético e considerações de princípios, processos e práticas de transições justas (*alta confiança*). Para indivíduos e famílias em áreas costeiras baixas, em Pequenas Ilhas e pequenos agricultores, a transição da adaptação incremental para a adaptação transformacional pode ajudar a superar limites de adaptação flexível (*alta confiança*). Uma governança eficaz é necessária para limitar os *trade-offs* de algumas opções de mitigação, tais como florestamento em larga escala e opções de bioenergia, devido aos riscos de sua implantação para sistemas alimentares, biodiversidade, outras funções e serviços dos ecossistemas e meios de subsistência (*alta confiança*). Uma governança eficaz requer capacidade institucional adequada em todos os níveis (*alta confiança*) {WGII SPM B.5.4, WGII SPM C.3.1, WGII SPM C.3.4; WGIII SPM D.1.3, WGIII SPM E.4.2; SR1.5 SPM C.3.4, SR1.5 SPM C.3.5, SR1.5 SPM Figura SPM.4, SR1.5 SPM D.4.3, SR1.5 SPM D.4.4}

Ações de adaptação e mitigação de curto prazo têm mais sinergias do que *trade-offs* com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

Sinergias e trade-offs dependem do contexto e da escala



Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 128

Figura 4.5: Potenciais sinergias e *trade-offs* entre o portfólio de opções de mitigação e adaptação à mudança do clima e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Esta figura apresenta um resumo de alto nível das sinergias e trade-offs potenciais avaliados na Figura SPM.4b e na Figura SPM.8 do WGII, com base na avaliação qualitativa e quantitativa de cada mitigação ou opção individualmente. Os ODS servem como uma estrutura analítica para a avaliação de diferentes dimensões de desenvolvimento sustentável, que se estendem além do prazo das metas dos ODS para 2030. Sinergias e *trade-offs* entre todas as opções individuais em um setor/sistema são agregados em potenciais de setor/sistema para todo o portfólio de mitigação ou adaptação.
O comprimento de cada barra representa o número total de opções de mitigação ou adaptação sob cada sistema/setor. O número de opções de adaptação e mitigação varia conforme o sistema/setor, e foi normalizado a 100% para que as barras sejam comparáveis entre mitigação, adaptação, sistema/setor e ODS. Links positivos mostrados em WGII Figura SPM 4b e WGIII Figura SPM 8 são contados e agregados para gerar a participação percentual de sinergias, aqui representada pela proporção azul dentro das barras. Links negativos mostrados em WGII Figura SPM 4b e WGIII Figura SPM 8 são contados e agregados para gerar a participação percentual de trade-offs e é representado pela proporção de laranja dentro das barras. Tanto sinergias como *trade-offs* mostrados em WGII Figura SPM 4b WGIII Figura SPM 8 são contados e agregados para gerar a participação percentual de "sinergias e *trade-off*", representados pela proporção de barras listradas dentro das barras.
A proporção "branca" dentro da barra indica evidência limitada/ nenhuma evidência/não avaliado.
Os sistemas de energia compreendem todas as opções de mitigação listadas na Figura SPM.8 do WGIII e na Figura SPM.4b do WGII para adaptação. Urbano e infraestrutura compreende todas as opções de mitigação listadas na Figura SPM.8 do WGIII sob Sistemas Urbanos, sob Edifícios e sob Transporte e opções de adaptação listadas na Figura SPM.4b do WGII sob Sistemas urbanos e de infraestrutura. O sistema terrestre compreende opções de mitigação listadas em WGIII Figura SPM.8 sob AFOLU e opções de adaptação listadas em WGII Figura SPM.4b sob sistemas terrestres e oceânicos: adaptação de base florestal, sistemas agroflorestais, gerenciamento da biodiversidade e conectividade de ecossistemas, melhor gerenciamento das terras cultivadas, gerenciamento eficiente da pecuária, eficiência no uso da água e gerenciamento dos recursos hídricos. Os ecossistemas oceânicos compreendem opções de adaptação listadas na Figura SPM.4b do WGII sob sistemas terrestres e oceânicos: defesa da costa e infraestrutura resiliente, gestão integrada da zona costeira e aquicultura e pesca sustentáveis. Sociedade, subsistência e economias compreende as opções de adaptação listadas na Figura SPM.4b do WGII, em Intersetorial; Indústria compreende todas as opções de mitigação listadas na Figura SPM.8 do WGIII, em Indústria.
O ODS 13 (Ação Climática) não está listado porque a mitigação/adaptação está sendo considerada em termos de interação com os ODS e não vice-versa (SPM SR1.5 Figure SPM.4 legenda). As barras denotam a força da conexão e não consideram a força do impacto sobre os ODS. As sinergias e os *trade-offs* diferem segundo o contexto e a escala de implementação. A escala de implementação é particularmente importante quando há competição por recursos escassos. Por uma questão de uniformidade, não estamos reportando os níveis de confiança porque existe uma diferença de conhecimento na relação opção-adaptação com os ODS e seu nível de confiança evidente em WGII fig SPM 4b. {WGII Figura SPM.4b; WGIII Figura SPM.8}

4.7 Governança e Política para Ações de Mudança do Clima no Curto Prazo

Uma ação climática eficaz requer compromisso político, uma governança multinível bem alinhada e estruturas institucionais, leis, políticas e estratégias. Ela precisa de objetivos claros, ferramentas financeiras e de financiamento adequadas, coordenação em múltiplos domínios políticos e processos de governança inclusiva. Muitos instrumentos de política de mitigação e adaptação foram implantados com sucesso, e poderiam apoiar reduções profundas de emissões e resiliência climática se forem ampliados e aplicados de forma abrangente, dependendo das circunstâncias nacionais. As ações de adaptação e mitigação se beneficiam do aproveitamento de diversos conhecimentos. (alta confiança)

Uma governança climática eficaz permite a mitigação e a adaptação, fornecendo uma direção geral baseada nas circunstâncias nacionais, estabelecendo metas e prioridades, integrando a ação climática em todos os domínios e níveis políticos, com base nas circunstâncias nacionais e no contexto da cooperação internacional. A governança eficaz melhora o monitoramento e a avaliação e a segurança regulatória, priorizando a tomada de decisões inclusivas, transparentes e equitativas, e melhora o acesso ao financiamento e à tecnologia (*alta confiança*). Estas funções podem ser promovidas por leis e planos relevantes ao clima, que estão crescendo em número entre setores e regiões, avançando os resultados de mitigação e benefícios de adaptação (*alta confiança*). As leis climáticas têm crescido em número e ajudado a produzir resultados de mitigação e adaptação (*confiança média*). {WGII SPM C.5, WGII SPM C.5.1, WGII SPM C5.4, WGII SPM C.5.6; WGIII SPM B.5.2, WGIII SPM E.3.1}

Instituições climáticas municipais, nacionais e subnacionais eficazes, tais como órgãos especializados e de coordenação, permitem processos de decisão coproduzidos e em múltiplas escalas, criam consenso para a ação entre os diversos interesses e informam os cenários estratégicos (*alta confiança*). Isso requer capacidade institucional adequada em todos os níveis (*alta confiança*). Vulnerabilidades e riscos climáticos são frequentemente reduzidos por meio de leis, políticas, processos participativos e intervenções cuidadosamente projetados e implementados que abordam inequidades específicas do contexto, tais como baseadas em gênero, etnia, deficiência, idade, localização e renda (*alta confiança*). O apoio político é influenciado pelos Povos Indígenas, empresas e atores da sociedade civil, incluindo os jovens, os trabalhadores, a mídia e as comunidades locais, e a eficácia é reforçada por parcerias entre muitos grupos diferentes da sociedade (*alta confiança*). Litígios relacionados ao clima têm crescido, com muitos casos em alguns países desenvolvidos e com um número muito menor em alguns países em desenvolvimento e, em alguns casos, tem influenciado o resultado e a ambição da governança climática (*confiança média*).
{WGII SPM C2.6, WGII SPM C.5.2, WGII SPM C.5.5, WGII SPM C.5.6, WGII SPM D.3.1; WGIII SPM E3.2, WGIII SPM E.3.3}

Uma governança climática eficaz é possibilitada por processos de decisão inclusivos, alocação de recursos apropriados e revisão, monitoramento e avaliação institucional (*alta confiança*). A governança multinível, híbrida e intersetorial facilita a consideração adequada de cobenefícios e *trade-offs*, particularmente nos setores fundiários onde os processos de decisão variam do nível da fazenda à escala nacional (*alta confiança*). A consideração da justiça climática pode ajudar a facilitar a reorientação de trajetórias de desenvolvimento em direção à sustentabilidade. {WGII SPM C.5.5, WGII SPM C.5.6, WGII SPM D.1.1, WGII SPM D.2, WGII SPM D.3.2; SRCCL SPM C.3, SRCCL TS.1}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 129

O aproveitamento de diversos conhecimentos e parcerias, inclusive com mulheres, jovens, Povos Indígenas, comunidades locais e minorias étnicas, pode facilitar o desenvolvimento resistente ao clima e tem permitido soluções localmente apropriadas e socialmente aceitáveis (*alta confiança*). {WGII SPM D.2, D.2.1}

Muitos instrumentos regulatórios e econômicos já foram implantados com sucesso. Esses instrumentos poderiam apoiar reduções profundas de emissões se forem ampliados e aplicados de forma mais abrangente. A experiência prática informa a concepção dos instrumentos e ajudou a melhorar a previsibilidade, a eficácia ambiental, a eficiência econômica e a equidade. (*alta confiança*) {WGII SPM E.4; WGIII SPM E.4.2}.

A ampliação e o aumento do uso de instrumentos regulatórios, consistente com as circunstâncias nacionais, pode melhorar os resultados de mitigação em aplicações setoriais (*alta confiança*), e instrumentos regulatórios que incluem mecanismos de flexibilidade podem reduzir os custos de redução de emissões (*confiança média*). {WGII SPM C.5.4; WGIII SPM E.4.1}

Quando implementados, os **instrumentos de precificação de carbono incentivaram medidas de redução de emissões de baixo custo, mas foram menos eficazes, por si só e a preços prevalecentes durante o período de avaliação, para promover medidas de custo mais elevado necessárias para novas reduções *(confiança média)*.** A receita dos impostos de carbono ou do comércio de emissões pode ser usada para objetivos de equidade e distribuição, por exemplo, para apoiar famílias de baixa renda, entre outras abordagens (*alta confiança*). Não há evidência consistente de que os atuais sistemas de comércio de emissões tenham levado a vazamentos significativos de emissões (*confiança média*). {WGIII SPM E4.2, WGIII SPM E.4.6}

A remoção de subsídios de combustíveis fósseis reduziria as emissões, melhoraria a receita pública e o desempenho macroeconômico, e produziria outros benefícios ambientais e de desenvolvimento sustentável, tais como melhor receita pública, desempenho macroeconômico e de sustentabilidade; a remoção de subsídios pode ter impactos distributivos adversos, especialmente nos grupos economicamente mais vulneráveis que, em alguns casos, podem ser mitigados por medidas como a redistribuição da receita economizada, e dependem de circunstâncias nacionais (*alta confiança*). A remoção do subsídio de combustível fóssil é projetada por vários estudos para reduzir as emissões globais de CO_2 em 1–4%, e as emissões de GEE em até 10% até 2030, variando entre regiões (*confiança média*). {WGIII SPM E.4.2}

Políticas nacionais de apoio ao desenvolvimento tecnológico e participação em mercados internacionais para redução de emissões podem trazer efeitos colaterais positivos para outros países (*confiança média*), embora a redução da demanda por combustíveis fósseis como resultado da política climática possa resultar em custos para os países exportadores (*alta confiança*). Os pacotes econômicos podem atender a metas econômicas de curto prazo, reduzindo as emissões e reorientando as trajetórias de desenvolvimento em direção à sustentabilidade (*confiança média*). Exemplos são compromissos de gastos públicos; reformas de preços; e investimentos em educação e treinamento, P&D e infraestrutura (*alta confiança*). Pacotes de políticas eficazes seriam abrangentes em termos de cobertura, aproveitados para uma visão clara de mudança, equilibrados entre objetivos, alinhados com as necessidades específicas de tecnologia e sistema, consistentes em termos de projeto e adaptados às circunstâncias nacionais (*alta confiança*). {WGIII SPM E4.4, WGIII SPM 4.5, WGIII SPM 4.6}

4.8 Fortalecendo a Resposta: Finanças, Cooperação Internacional e Tecnologia

As finanças, a cooperação internacional e a tecnologia são fatores críticos para a aceleração da ação climática. Para que as metas climáticas sejam alcançadas, tanto o financiamento para adaptação quanto o financiamento para mitigação teriam que aumentar substancialmente. Há capital global suficiente para fechar as lacunas de investimento global, mas existem barreiras para redirecionar o capital para a ação climática. As barreiras incluem barreiras institucionais, regulamentares e de acesso ao mercado, são reduzidas e atendem às necessidades e oportunidades, vulnerabilidade econômica e endividamento em muitos países em desenvolvimento. O aumento da cooperação internacional é possível mediante múltiplos canais. A melhoria dos sistemas de inovação tecnológica é fundamental para acelerar a adoção generalizada de tecnologias e práticas. (alta confiança)

4.8.1. Financiamento para Ações de Mitigação e Adaptação

Uma melhor disponibilidade e acesso ao financiamento[100] permitirá uma ação climática acelerada (*confiança muito alta*). O atendimento das necessidades e lacunas e a ampliação do acesso equitativo ao financiamento nacional e internacional, quando combinado com outras ações de apoio, pode atuar como catalisador para acelerar a mitigação e reorientar as trajetórias de desenvolvimento *(alta confiança)*. O desenvolvimento resistente ao clima é possibilitado pelo aumento da cooperação internacional, incluindo melhor acesso a recursos financeiros, particularmente para regiões, setores e grupos vulneráveis, e governança inclusiva e políticas coordenadas

[100] As finanças podem originar-se de diversas fontes, isoladamente ou em combinação: públicas ou privadas, locais, nacionais ou internacionais, bilaterais ou multilaterais, e fontes alternativas (por exemplo, filantrópicas, compensações de carbono). Pode ser sob a forma de subvenções, assistência técnica, empréstimos (concessionais e não concessionais), títulos, ações, seguros de risco e garantias financeiras (de vários tipos).

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 130

(alta confiança). A cooperação financeira internacional acelerada é um habilitador crítico de baixo GEE e de transições justas, e pode abordar as desigualdades no acesso ao financiamento e os custos e a vulnerabilidade aos impactos da mudança do clima (*alta confiança*). {WGII SPM C.1.2, WGII SPM C.3.2, WGII SPM C.5, WGII SPM C.5.4, WGII SPM D.2, WGII SPM D.3.2, WGII SPM D.5, WGII SPM D.5.2; WGIII SPM B.4.2, WGIII SPM B.5, WGIII SPM B.5.4, WGIII SPM C.4.2, WGIII SPM C.7.3, WGIII SPM C.8.5, WGIII SPM D.1.2, WGIII SPM D.2.4, WGIII SPM D.3.4, WGIII SPM E.2.3, WGIII SPM E.3.1, WGIII SPM E.5, WGIII SPM E.5.1, WGIII SPM E.5.2, WGIII SPM E.5.3, WGIII SPM E.5.4, WGIII SPM E.6.2}

Tanto o financiamento de adaptação quanto o de mitigação precisam aumentar substancialmente, para enfrentar os crescentes riscos climáticos e acelerar os investimentos na redução de emissões (*alta confiança*). O aumento do financiamento abordaria limites flexíveis à adaptação e riscos climáticos crescentes, ao mesmo tempo em que evitaria algumas perdas e danos relacionados, particularmente em países em desenvolvimento vulneráveis (*alta confiança*). Uma maior mobilização e acesso ao financiamento, juntamente com a capacitação, são essenciais para a implementação de ações de adaptação e para reduzir as lacunas de adaptação, dados os riscos e custos crescentes, especialmente para os grupos, regiões e setores mais vulneráveis (*alta confiança*). O financiamento público é um importante habilitador de adaptação e mitigação e também pode alavancar o financiamento privado (*alta confiança*). O financiamento da adaptação provém predominantemente de fontes públicas, e mecanismos e financiamentos públicos podem alavancar o financiamento do setor privado, abordando barreiras reais e percebidas em termos de regulamentação, custos e mercado, por exemplo, através de parcerias público-privadas (*alta confiança*). Os recursos financeiros e tecnológicos permitem a implementação efetiva e contínua da adaptação, especialmente quando apoiados por instituições com um forte entendimento das necessidades e capacidade de adaptação (*alta confiança*). As necessidades médias anuais modeladas de investimento em mitigação para 2020 a 2030 em cenários que limitam o aquecimento a 2ºC ou 1,5ºC são um fator de três a seis vezes maior do que os níveis atuais, e os investimentos totais em mitigação (públicos, privados, domésticos e internacionais) precisariam aumentar em todos os setores e regiões (*confiança média*). Mesmo que sejam implementados amplos esforços globais de mitigação, haverá uma grande necessidade de recursos financeiros, técnicos e humanos para adaptação *(alta confiança)* (Seção 2.3.2, 2.3.3, 4.4, Figura 4.6) {WGII SPM C.1.2, WGII SPM C2.11, WGII SPM C.3, WGII SPM C.3.2, WGII SPM C3.5, WGII SPM C.5, WGII SPM C.5.4, WGII SPM D.1, WGII SPM D.1.1, WGII SPM D.1.2, WGII SPM C.5.4; WGIII SPM D.2.4,WGIII SPM E.5, WGIII SPM E.5.1, WGIII Capítulo 15.2}

Existe capital e liquidez globais suficientes para reduzir as lacunas de investimento global, dado o tamanho do sistema financeiro global, mas existem barreiras para redirecionar o capital para a ação climática tanto dentro como fora do setor financeiro global e no contexto das vulnerabilidades econômicas e do endividamento que muitos países em desenvolvimento enfrentam (*alta confiança*). Para mudanças no financiamento privado, as opções incluem uma melhor avaliação dos riscos relacionados ao clima e oportunidades de investimento dentro do sistema financeiro, reduzindo as inadequações setoriais e regionais entre o capital disponível e as necessidades de investimento, melhorando os perfis de retorno de risco dos investimentos climáticos, e desenvolvendo as capacidades institucionais e os mercados de capital locais. As barreiras macroeconômicas incluem, entre outras, o endividamento e a vulnerabilidade econômica das regiões em desenvolvimento. (*alta confiança*).
{WGIISPM C.5.4; WGIII SPM E.4.2, WGIII SPM E.5, WGIII SPM E.5.2, WGIII SPM E.5.3}

O aumento dos fluxos financeiros requer uma sinalização clara por parte dos governos e da comunidade internacional. Os fluxos financeiros rastreados ficam aquém dos níveis necessários para a adaptação e para atingir metas de mitigação em todos os setores e regiões. Essas lacunas criam muitas oportunidades e o desafio de reduzir lacunas é maior nos países em desenvolvimento. Isto inclui um alinhamento mais forte do financiamento público, diminuindo as barreiras regulatórias, de custo e de mercado reais e percebidas, e níveis mais altos de financiamento público para diminuir os riscos associados a investimentos com baixas emissões. Os riscos iniciais impedem projetos economicamente sólidos de baixo carbono, e o desenvolvimento de mercados de capital locais são uma opção. Investidores, intermediários financeiros, bancos centrais e reguladores financeiros podem mudar a subprecificação sistêmica dos riscos relacionados ao clima. Uma rotulagem robusta de títulos e transparência é necessária para atrair poupadores. (*alta confiança*). {WGII SPM C.5.4; WGIII SPM B.5.4, WGIII SPM E.4, WGIII SPM E.5.4, WGIII Seção 15.2, 15.6.1, 15.6.2, 15.6.7}

As maiores lacunas e oportunidades de financiamento climático estão nos países em desenvolvimento (*alta confiança*). O apoio acelerado dos países desenvolvidos e das instituições multilaterais é um habilitador crítico para melhorar as ações de mitigação e adaptação e pode abordar as inequidades nas finanças, incluindo seus custos, termos e condições, e a vulnerabilidade econômica à mudança do clima. Subsídios públicos em escala para mitigação e financiamento de adaptação para regiões vulneráveis, por exemplo, na África Subsaariana, seriam rentáveis e teriam alto retorno social em termos de acesso à energia básica. As opções para aumentar a mitigação e adaptação nas regiões em desenvolvimento incluem: maiores níveis de financiamento público e fluxos financeiros privados mobilizados publicamente dos países desenvolvidos para os países em desenvolvimento no contexto da meta de US$ 100 bilhões por ano do Acordo de Paris; aumentar o uso de garantias públicas para reduzir os riscos e alavancar os fluxos privados a custos menores; desenvolvimento dos mercados de capital locais; e construção de maior confiança nos processos de cooperação internacional. Um esforço coordenado para tornar a recuperação pós-pandêmica sustentável a longo prazo através do aumento dos fluxos de financiamento ao longo desta década pode acelerar a ação climática, inclusive em regiões em desenvolvimento que enfrentam altos custos de dívida, dificuldades de endividamento e incerteza macroeconômica. (*alta confiança*) {WGII SPM C.5.2, WGII SPM C.5.4, WGII SPM C.6.5, WGII SPM D.2, WGII TS.D.10.2; WGIII SPM E.5, WGIII SPM E.5.3, WGIII TS.6.4, WGIII Caixa TS.1, WGIII Capítulo 15.2, WGIII Capítulo 15.6}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 131

4.8.2 Cooperação e Coordenação Internacional

A **cooperação internacional é um habilitador crítico para alcançar metas ambiciosas de mitigação da mudança do clima e desenvolvimento resiliente ao clima (*alta confiança*)**. O desenvolvimento resiliente ao clima é possibilitado pela maior cooperação internacional, incluindo a mobilização e melhoria do acesso ao financiamento, particularmente para os países em desenvolvimento, regiões, setores e grupos vulneráveis e o alinhamento dos fluxos financeiros para que a ação climática seja consistente com os níveis de ambição e as necessidades de financiamento (*alta confiança*). Embora os processos e objetivos acordados, tais como os da UNFCCC, Protocolo de Quioto e Acordo de Paris, estejam ajudando (Seção 2.2.1), o apoio financeiro, tecnológico e de capacitação internacional aos países em desenvolvimento permitirá maior implementação e ações mais ambiciosas (*confiança média*). Ao integrar equidade e justiça climática, as políticas domésticas e internacionais podem ajudar a facilitar a reorientação das trajetórias de desenvolvimento em direção à sustentabilidade, especialmente mobilizando e melhorando o acesso ao financiamento para regiões, setores e comunidades vulneráveis (*alta confiança*). A cooperação e coordenação internacional, incluindo pacotes de políticas combinadas, podem ser particularmente importantes para as transições de sustentabilidade nas indústrias de materiais básicos de emissão intensiva e altamente comercializados que estão expostos à concorrência internacional (*alta confiança*). A grande maioria dos estudos de modelagem de emissões assume uma cooperação internacional significativa para assegurar fluxos financeiros e abordar as questões de inequidade e pobreza nas trajetórias que limitam o aquecimento global. Há grandes variações nos efeitos modelados da mitigação do PIB entre regiões, dependendo notavelmente da estrutura econômica, da redução das emissões regionais, do desenho de políticas e do nível de cooperação internacional (*alta confiança*). O atraso da cooperação global aumenta os custos das políticas entre regiões (*alta confiança*). {WGII SPM D.2, WGII SPM D.3.1, WGII SPM D.5.2; WGIII SPM D.3.4, WGIII SPM C5.4, WGIII SPM C.12.2, WGIII SPM E.6, WGIII SPM E.6.1, WGIII E.5.4, WGIII TS.4.2, WGIII TS.6.2; SR1.5 SPM D.6.3, SR1.5 SPM D.7, SR1.5 SPM D.7.3}.

A natureza transfronteiriça de muitos riscos da mudança do clima (por exemplo, para cadeias de abastecimento, mercados e fluxos de recursos naturais em alimentos, pesca, energia e água, e potencial para conflitos) aumenta a necessidade de uma gestão transfronteiriça informada sobre o clima, cooperação, respostas e soluções mediante processos de governança multinacionais ou regionais (*alta confiança*). Os esforços multilaterais de governança podem ajudar a conciliar interesses em disputa, visões do mundo e valores sobre como lidar com a mudança do clima. Acordos internacionais ambientais e setoriais, e iniciativas em alguns casos, podem ajudar a estimular investimentos baixos em GEE e reduzir as emissões (como o esgotamento da camada de ozônio, poluição do ar transfronteiriça e emissões atmosféricas de mercúrio). A melhoria das estruturas de governança domésticas e internacionais permitiria ainda mais a descarbonização do transporte marítimo e aéreo através da utilização de combustíveis com baixas emissões, por exemplo, através de padrões mais rígidos de eficiência e intensidade de carbono. As parcerias transnacionais também podem estimular o desenvolvimento de políticas, a difusão de tecnologia de baixas emissões, a redução de emissões e adaptação, ligando atores subnacionais e outros atores, incluindo cidades, regiões, organizações não governamentais e entidades do setor privado, e aumentando as interações entre atores estatais e não estatais, embora permaneçam incertezas sobre seus custos, viabilidade e eficácia. Os acordos, instituições e iniciativas ambientais e setoriais internacionais estão ajudando, e em alguns casos podem ajudar a estimular investimentos com baixas emissões de GEE e a reduzir as emissões. (*confiança média*) {WGII SPM B.5.3, WGII SPM C.5.6, WGII TS.E.5.4, WGII TS.E.5.5, WGIII SPM C.8.4, WGIII SPM E.6.3, WGIII SPM E.6.4, WGIII SPM E.6.4, WGIII TS.5.3}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 132

Maiores fluxos de investimento em mitigação necessários para que todos os setores e regiões limitem o aquecimento global

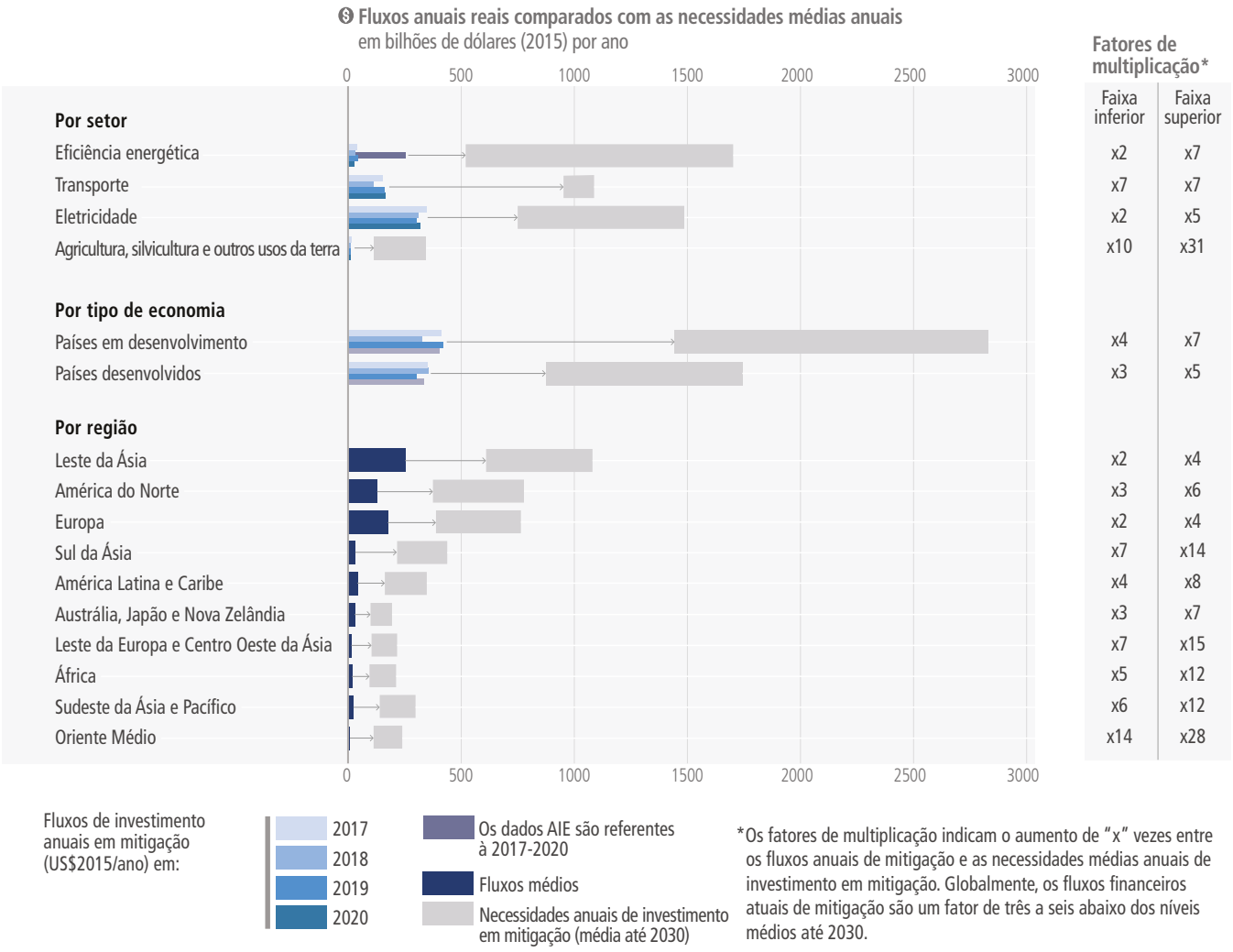


Figura 4.6: Distribuição dos fluxos médios de investimento em mitigação e das necessidades de investimento até 2030 (bilhões de dólares).
Fluxos de investimento em mitigação e necessidades de investimento por setor (eficiência energética, transporte, eletricidade e agricultura, silvicultura e outros usos da terra), por tipo de economia e por região (consulte WGIII Anexo II Parte I Seção 1 para os esquemas de classificação de países e áreas).
As barras azuis exibem dados sobre os fluxos de investimentos em mitigação por quatro anos: 2017, 2018, 2019 e 2020, por setor e por tipo de economia. Para a divisão regional, são mostrados os fluxos médios anuais de investimentos em mitigação para 2017–2019. As barras cinza mostram o nível mínimo e máximo das necessidades de investimento anual em mitigação global nos cenários avaliados. Esta foi a média até 2030. Os fatores de multiplicação mostram a relação entre a média global das necessidades de investimento inicial em mitigação (média até 2030) e os fluxos anuais atuais em mitigação (média para 2017/18–2020). O fator de multiplicação mais baixo refere-se à extremidade inferior da gama de necessidades de investimento. O fator de multiplicação superior refere-se à gama superior de necessidades de investimento.
Dadas as múltiplas fontes e a falta de metodologias harmonizadas, os dados só podem ser considerados se forem indicativos do tamanho e do padrão das necessidades de investimento. {WGIII Figura TS.25, WGIII Secções 15.3, 15.4, 15.5, Tabela 15.2, Tabela 15.3, Tabela 15.4}

4.8.3 Inovação, Adoção, Difusão e Transferência Tecnológica

O aprimoramento dos sistemas de inovação tecnológica pode proporcionar oportunidades para reduzir o crescimento de emissões e criar cobenefícios sociais e ambientais. Os pacotes de políticas adaptados aos contextos nacionais e às características tecnológicas têm sido eficazes no apoio à inovação de baixas emissões e à difusão de tecnologia. O apoio à inovação tecnológica bem-sucedida de baixo carbono inclui políticas públicas como treinamento e P&D, complementadas por instrumentos regulatórios e baseados no mercado que criam incentivos e oportunidades de mercado, como padrões de desempenho de aparelhos e códigos de construção. (*alta confiança*) {WGIII SPM B.4, WGIII SPM B.4.4, WGIII SPM E.4.3, WGIII SPM E4.4}.

A **cooperação internacional em sistemas de inovação e desenvolvimento e transferência de tecnologia, acompanhada de capacitação, compartilhamento de conhecimento e apoio técnico e financeiro, pode acelerar a difusão global de tecnologias, práticas e políticas de mitigação e alinhá-las a outros objetivos de desenvolvimento (*alta confiança*)**. A arquitetura de escolha pode ajudar os usuários finais a adotar tecnologia e opções de baixo consumo

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 133

de GEE (*alta confiança*). A adoção de tecnologias de baixas emissões é atrasada na maioria dos países em desenvolvimento, particularmente os menos desenvolvidos, devido em parte às condições habilitadoras mais fracas, incluindo financiamento limitado, desenvolvimento e transferência de tecnologia e capacitação (*confiança média*). {WGIII SPM B.4.2, WGIII SPM E.6.2, WGIII SPM C.10.4, WGIII Capítulo 16.5}

A cooperação internacional em inovação funciona melhor quando adaptada e benéfica para as cadeias de valor locais, quando os parceiros colaboram em pé de igualdade, e quando a capacitação é parte integrante do esforço (*confiança média*). {WGIII SPM E.4.4, WGIII SPM E.6.2}.

A **inovação tecnológica pode ter *trade-offs* que incluem externalidades tais como novos e maiores impactos ambientais e desigualdades sociais; efeitos de repercussão que levam a menores reduções líquidas de emissões ou mesmo aumentos de emissões; e dependência excessiva do conhecimento e dos fornecedores estrangeiros (*alta confiança*).** Políticas e governança adequadamente concebidas ajudaram a lidar com impactos distributivos e efeito rebote (*alta confiança*). Por exemplo, as tecnologias digitais podem promover grandes aumentos na eficiência energética através da coordenação e uma mudança econômica para os serviços (*alta confiança*). Entretanto, a digitalização da sociedade pode induzir maior consumo de bens e energia e aumento do lixo eletrônico, além de ter um impacto negativo nos mercados de trabalho e agravar as desigualdades entre e dentro dos países (*confiança média*). A digitalização requer uma governança e políticas apropriadas para aumentar o potencial de mitigação (*alta confiança*). Pacotes de políticas eficazes podem ajudar a efetivar sinergias, evitar *trade-offs* e/ou reduzir o efeito rebote: estes podem incluir uma combinação de metas de eficiência, padrões de desempenho, fornecimento de informações, preços de carbono, financiamento e assistência técnica (*alta confiança)*. {WGIIISPM B.4.2, WGIII SPM B.4.3, WGIII SPM E.4.4, WGIII TS 6.5, WGIII Caixa de Capítulo Transversal 11 sobre Digitalização no Capítulo 16}

A transferência de tecnologia para expandir o uso de tecnologias digitais para o monitoramento do uso da terra, o manejo sustentável da terra e a melhoria da produtividade agrícola apoia a redução das emissões resultantes do desmatamento e da mudança no uso da terra, ao mesmo tempo em que melhora a contabilização e a padronização dos GEE (*confiança média*) {SRCCL SPM C.2.1, SRCCL SPM D.1.2, SRCCL SPM D.1.4, SRCCL Capítulo 7.4.4, SRCCL Capítulo 7.4.6}.

4.9 Integração de Ações no Curto Prazo entre Setores e Sistemas

A viabilidade, eficácia e benefícios das ações de mitigação e adaptação são aumentados quando são empreendidas soluções multi-setoriais transversalmente aos sistemas. Quando tais opções são combinadas com objetivos mais amplos de desenvolvimento sustentável, elas podem produzir maiores benefícios para o bem-estar humano, equidade social e justiça, e saúde do ecossistema e planetária. *(alta confiança)*

As estratégias de desenvolvimento resilientes ao clima que tratam o clima, os ecossistemas e a biodiversidade, e a sociedade humana como partes de um sistema integrado, são as mais eficazes (*alta confiança*). A vulnerabilidade humana e dos ecossistemas são interdependentes (*alta confiança*). O desenvolvimento resiliente ao clima acontece quando os processos e ações de tomada de decisão são integrados entre setores (*confiança muito alta*). As sinergias com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e o progresso em direção a eles aumentam as perspectivas de desenvolvimento resiliente ao clima. As escolhas e ações que tratam os seres humanos e os ecossistemas como um sistema integrado baseiam-se em diversos conhecimentos sobre riscos climáticos, abordagens equitativas, justas e inclusivas, e gestão de ecossistemas. {WGII SPM B.2, WGII Figura SPM.5, WGII SPM D.2, WGII SPM D2.1, WGII SPM 2.2, WGII SPM D4, WGII SPM D4.1, WGII SPM D4.2, WGII SPM D5.2, WGII SPM Figura SPM.5}.

Abordagens que alinham objetivos e ações entre setores oferecem oportunidades para benefícios múltiplos e em larga escala e evitam danos a curto prazo. **Tais medidas também podem alcançar maiores benefícios por meio de efeitos de cascata em todos os setores (*confiança média*).** Por exemplo, a viabilidade do uso da terra tanto para a agricultura quanto para a produção solar centralizada pode aumentar quando tais opções são combinadas (*alta confiança*). Da mesma forma, o planejamento e as operações integradas de transporte e infraestrutura energética podem, juntos, reduzir os impactos ambientais, sociais e econômicos da descarbonização dos setores de transporte e energia (*alta confiança*). A implementação de pacotes de múltiplas estratégias de mitigação em escala de cidade pode ter efeitos em cascata entre setores e reduzir as emissões de GEE dentro e fora das fronteiras administrativas de uma cidade (*confiança muito alta*). Abordagens de projeto integradas para a construção e modernização de edificações fornecem exemplos crescentes de edificações com energia zero ou zero carbono em várias regiões. Para minimizar a má adaptação, planejamento multissetorial, multiatores e inclusivo com trajetórias flexíveis encoraja ações oportunas de baixo risco que mantêm as opções em aberto, garantindo benefícios em múltiplos setores e sistemas e sugerindo o espaço de solução disponível para a adaptação à mudança do clima a longo prazo (*confiança muito alta*). *Trade-offs* em termos de emprego, uso da água, competição pelo uso da terra e biodiversidade, assim como o acesso à energia, alimentos e água, e a acessibilidade de preços, podem ser evitados mediante opções de mitigação bem implementadas, especialmente aquelas que não ameaçam os usos sustentáveis da terra e os direitos da terra existentes, com estruturas para a implementação de políticas integradas (*alta confiança)*{WGII SPM C.2, WGII SPM C.2.1–2.13, WGII SPM C.4.4; WGIII SPM C.6.3, WGIII SPM C.6, WGIII SPM C.7.2, WGIII SPM C.8.5, WGIII SPM D.1.2, WGIII SPM D.1.5, WGIII SPM E.1.2}

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 134

Mitigação e adaptação, quando implementadas em conjunto, e combinadas com objetivos mais amplos de desenvolvimento sustentável, produziriam múltiplos benefícios para o bem-estar humano, bem como para a saúde dos ecossistemas e do planeta (*alta confiança*). A gama de tais interações positivas é significativa no cenário das políticas climáticas a curto prazo entre regiões, setores e sistemas. Por exemplo, as ações de mitigação de AFOLU na mudança do uso da terra e na silvicultura, quando implementadas de forma sustentável, podem proporcionar reduções e remoções de emissões de GEE em larga escala que beneficiam simultaneamente a biodiversidade, a segurança alimentar, o fornecimento de madeira e outros serviços ecossistêmicos, mas não podem compensar totalmente as ações de mitigação atrasadas em outros setores. As medidas de adaptação na terra, no oceano e nos ecossistemas podem igualmente ter benefícios generalizados para a segurança alimentar, a nutrição, a saúde e o bem-estar, os ecossistemas e a biodiversidade. Da mesma forma, os sistemas urbanos são locais críticos e interligados para o desenvolvimento resiliente ao clima; políticas urbanas que implementam múltiplas intervenções podem gerar ganhos de adaptação ou mitigação com equidade e bem-estar humano. Pacotes de políticas integradas podem melhorar a capacidade de integrar considerações de equidade, igualdade de gênero e justiça. Políticas e planos intersetoriais coordenados podem maximizar as sinergias e evitar ou reduzir os *trade-offs* entre mitigação e adaptação.

Uma ação eficaz em todas as áreas acima exigirá compromisso político e acompanhamento a curto prazo, cooperação social, financiamento e políticas e apoio e ações intersetoriais mais integradas. (*alta confiança*). (3.4, 4.4) {WGII SPM C.1, WG II SPM C.2, WGII SPM C.2, WGII SPM C.5, WGII SPM D.2, WGII SPM D.3.2, WGII SPM D.3.3, WGII SPM Figura SPM.4; WGIII SPM C.6.3, WGIII SPM C.8.2, WGIII SPM C.9, WGIII SPM C.9.1, WGIII SPM C.9.2, WGIII SPM D.2, WGIII SPM D.2.4, WGIII SPM D.3.2, WGIII SPM E.1, WGIII SPM E.2.4, WGIII SPM Figura SPM.8, WGIII TS.7, WGIII TS Figura TS.29: SRCCL ES Seção 7.4.8, SRCCL SPM B.6}

Anexos

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 137

Anexo I
Glossário

Equipe Editorial

Andy Reisinger (Nova Zelândia), Diego Cammarano (Itália), Andreas Fischlin (Suíça), Jan S. Fuglestvedt (Noruega), Gerrit Hansen (Alemanha), Yonghun Jung (República da Coreia), Chloé Ludden (Alemanha/França), Valérie Masson-Delmotte (França), J.B. Robin Matthews (França/Reino Unido), Katja Mintenbeck (Alemanha), Dan Jezreel Orendain (Filipinas/Bélgica), Anna Pirani (Itália), Elvira Poloczanska (Reino Unido/Austrália), José Romero (Suíça)

Este anexo deve ser citado como: IPCC, 2023: Annex I: Glossary [Reisinger, A., D. Cammarano, A. Fischlin, J.S. Fuglestvedt, G. Hansen, Y. Jung, C. Ludden, V. Masson-Delmotte, R. Matthews, J.B.K Mintenbeck, D.J. Orendain, A. Pirani, E. Poloczanska, and J. Romero (eds.)]. *In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 119-130, doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.002.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 138

Este Glossário do Relatório Síntese (SYR) conciso define termos-chave selecionados utilizados neste relatório, extraídos dos glossários das três contribuições do Grupo de Trabalho para o AR6. Um conjunto mais abrangente e harmonizado de definições para os termos utilizados neste SYR e nos três relatórios do Grupo de Trabalho do AR6 está disponível no Glossário On-line do IPCC: https://apps.ipcc.ch/glossary/

Solicita-se aos leitores que consultem este abrangente glossário on-line para as definições de termos de natureza mais técnica e referências científicas relevantes para termos individuais. As palavras em itálico indicam que o termo está definido neste documento ou/e no glossário on-line. Os subtermos aparecem em itálico abaixo dos termos principais.

Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável
Resolução da ONU de setembro de 2015 que adota um plano de ação para as pessoas, o planeta e a prosperidade em um novo quadro de desenvolvimento global ancorado em 17 *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*.

Mudança abrupta do clima
Uma *mudança abrupta* em grande escala no *sistema climático* que ocorre ao longo de algumas décadas ou menos, persiste (ou se prevê que persista) por pelo menos algumas décadas e causa *impactos* substanciais nos *sistemas humanos e/ou naturais*. **Veja também:** *Mudança abrupta, Ponto de inflexão*.

Adaptação
Nos *sistemas humanos*, o processo de ajuste ao clima real ou esperado e seus efeitos a fim de moderar os danos ou explorar oportunidades benéficas. Em *sistemas naturais*, o processo de ajuste ao clima real e seus efeitos; a intervenção humana pode facilitar o ajuste ao clima esperado e seus efeitos. **Veja também:** *Opções de adaptação, Capacidade adaptativa, Ações desadaptativas (desadaptação)*.

Lacuna de adaptação
A diferença entre a *adaptação* efetivamente implementada e uma meta estabelecida socialmente, determinada em grande parte por preferências relacionadas aos impactos tolerados da mudança do clima e que refletem as limitações de recursos e as prioridades concorrentes.

Limites de adaptação
O ponto em que os objetivos de um ator (ou necessidades do sistema) não podem ser protegidos de *riscos* intoleráveis por meio de ações adaptativas.

- Limite de *adaptação* rígido - Nenhuma ação adaptativa é possível para evitar riscos intoleráveis.
- Limite de *adaptação* flexível - Podem existir opções, mas não estão atualmente disponíveis para evitar riscos intoleráveis por meio de ações adaptativas.

Adaptação transformacional
Adaptação que altera os atributos fundamentais de um sistema socioecológico em antecipação à *mudança do clima* e seus *impactos*.

Aerossol
Suspensão de partículas sólidas ou líquidas transportadas pelo ar, com tamanho típico de partícula na faixa de alguns nanômetros a várias dezenas de micrômetros e vida útil atmosférica de até vários dias na *troposfera* e até anos na *estratosfera*. O termo aerossol, que inclui tanto as partículas quanto o gás de suspensão, é frequentemente utilizado neste relatório em sua forma plural para significar "partículas de aerossol". Os aerossóis podem ser de origem natural ou antropogênica na troposfera; os aerossóis estratosféricos são, em sua maioria, provenientes de erupções vulcânicas. Os aerossóis podem causar um *forçamento radiativo efetivo* diretamente por meio da dispersão e absorção da radiação *(interação aerossol-radiação)* e indiretamente ao atuar como *núcleos de condensação de nuvens* ou partículas nucleadoras de gelo que afetam as propriedades das nuvens *(interação aerossol-nuvem)* e na deposição em superfícies cobertas de neve ou gelo. Os aerossóis atmosféricos podem ser emitidos como material particulado primário ou formados na *atmosfera* a partir de *precursores* gasosos (produção secundária). Os aerossóis podem ser compostos de sal marinho, carbono orgânico, *carbono negro* (BC), espécies minerais (principalmente poeira do deserto), sulfato, nitrato e amônio ou suas misturas. **Veja também:** *Material particulado (PM), Interação aerossol-radiação, Forçantes climáticas de curta duração (SLCFs)*.

Florestamento
Conversão para floresta de terras que historicamente não continham florestas. **Veja também:** *Remoções antropogênicas, Remoção de dióxido de carbono (CDR), Desmatamento, Redução das Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+), Reflorestamento*.

[Observação: para uma discussão sobre o termo floresta e termos relacionados, como *florestamento*, *reflorestamento e desmatamento*, consulte as Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa e seu Refinamento de 2019 e as informações fornecidas pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima].

Seca agrícola
Veja: *Seca*.

Agricultura, Silvicultura e Outros Usos da Terra (AFOLU)
No contexto dos inventários nacionais de *gases de efeito estufa (GEE)* no âmbito da *Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)*, AFOLU é a soma dos setores de inventário de GEE Agricultura e *Uso da Terra*, *Mudança do Uso da Terra e Florestas (LULUCF)*; consulte as Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários Nacionais de GEE para obter detalhes. Dada a diferença na estimativa das remoções *'antropogênicas' de dióxido de carbono (CO_2)* entre os países e a comunidade global de modelos, as emissões líquidas de GEE relacionadas à terra dos modelos globais incluídos neste relatório não são necessariamente diretamente comparáveis às estimativas do LULUCF nos inventários nacionais de GEE. **Veja também:** *Uso da terra, mudança do uso da terra e florestas (LULUCF), Mudança do uso da terra (LUC)*.

Agrofloresta
Nome coletivo para sistemas e tecnologias de *uso da terra* em que plantas lenhosas perenes (árvores, arbustos, palmeiras, bambus, etc.) são deliberadamente utilizadas nas mesmas unidades de *manejo da terra* que culturas agrícolas e/ou animais, em alguma forma de arranjo espacial ou sequência temporal. Nos sistemas agroflorestais, há interações ecológicas e econômicas entre os diferentes componentes. Agrofloresta também pode

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 139

ser definida como um sistema de gestão de recursos naturais dinâmico e de base ecológica que, por meio da integração de árvores em fazendas e na paisagem agrícola, diversifica e sustenta a produção para aumentar os benefícios sociais, econômicos e ambientais para os usuários da terra em todos os níveis.

Antropogênico
Resultante de ou produzido por atividades humanas.

Mudança de comportamento
Neste relatório, mudança de comportamento se refere à alteração das decisões e ações humanas de forma a mitigar a *mudança do clima* e/ou reduzir as consequências negativas dos impactos da mudança do clima.

Biodiversidade
Biodiversidade ou diversidade biológica significa a variabilidade entre organismos vivos de todas as origens, incluindo, entre outros, ecossistemas terrestres, marinhos e outros *ecossistemas* aquáticos e os complexos ecológicos dos quais fazem parte; isso inclui a diversidade dentro de espécies, entre espécies e de ecossistemas. **Veja também:** *Ecossistema*, *Serviços ecossistêmicos*.

Bioenergia
Energia derivada de qualquer forma de biomassa ou de seus subprodutos metabólicos.
Veja também: *Biocombustível*.

Bioenergia com captura e armazenamento de dióxido de carbono (BECCS)
Tecnologia de captura e armazenamento de dióxido de carbono (CCS) aplicada a uma *instalação de bioenergia*. Deve-se observar que, dependendo das emissões totais da cadeia de fornecimento de BECCS, *o dióxido de carbono ($_{CO2}$)* pode ser removido da atmosfera. **Veja também:** *Remoções antropogênicas*, *Captura e armazenamento de dióxido de carbono (CCS)*, *Remoção de dióxido de carbono (CDR)*.

Carbono azul
Fluxos e armazenamento de carbono de origem biológica em sistemas marinhos passíveis de gestão. O carbono azul costeiro se concentra na vegetação enraizada na zona costeira, como pântanos de maré, mangues e ervas marinhas. Esses *ecossistemas* têm altas taxas de enterramento de carbono por unidade de área e acumulam carbono em seus solos e sedimentos. Elas proporcionam muitos benefícios não climáticos e podem contribuir para a *adaptação baseada em ecossistemas*. Se degradados ou perdidos, os ecossistemas costeiros de carbono azul provavelmente liberarão a maior parte de seu carbono de volta à *atmosfera*. *Atualmente, há um debate sobre a aplicação do conceito de carbono azul a outros processos e ecossistemas costeiros e não costeiros, incluindo o oceano aberto.* **Veja também:** *Serviços ecossistêmicos*, *Sequestro*.

Infraestrutura azul
Veja: *Infraestrutura*.

Orçamento de carbono
Refere-se a dois conceitos na literatura:
(1) uma avaliação das *fontes* e *sumidouros* do ciclo de carbono a nível global, por meio da síntese de evidências de emissões de *combustíveis fósseis* e cimento, emissões e remoções associadas ao *uso* e à *mudança do uso da terra*, fontes e sumidouros de *dióxido de carbono (CO_2)* do oceano e do solo natural e a mudança resultante na concentração atmosférica de CO_2. Isto é chamado de Orçamento Global de Carbono; (2) a quantidade máxima de emissões globais *antropogênicas* líquidas cumulativas de CO_2 que resultaria na limitação do *aquecimento global* a um determinado nível com uma determinada probabilidade, levando em conta o efeito de outras *forçantes* climáticas *antropogênicos*. Isto é chamado de Orçamento Total de Carbono quando expresso a partir do período *pré-industrial*, e de Orçamento Remanescente de Carbono quando expresso a partir de uma data recente especificada.

[Nota 1: as emissões antropogênicas líquidas de CO_2 são as emissões *antropogênicas* de CO_2 menos as remoções *antropogênicas* de CO_2. **Veja também:** *Remoção de dióxido de carbono (CDR)*.
Nota 2: a quantidade máxima de emissões globais *antropogênicas* líquidas cumulativas de CO_2 é atingida no momento em que as emissões *antropogênicas* anuais líquidas de CO_2 atingem zero.
Nota 3: o grau em que as forçantes climáticas *antropogênicas* que não o CO_2 afetam o orçamento total de carbono e o orçamento remanescente de carbono depende das escolhas humanas sobre a extensão em que essas forçantes são mitigadas e seus efeitos climáticos resultantes.
Nota 4: as noções de orçamento total de carbono e orçamento remanescente de carbono também vêm sendo aplicadas em partes da literatura científica e por algumas entidades a nível regional, nacional ou subnacional. A distribuição dos orçamentos globais entre diferentes entidades e emissores individuais muito depende de considerações de *equidade* e outros julgamentos de valor].

Captura e armazenamento de dióxido de carbono (CCS)
Processo no qual um fluxo relativamente puro de *dióxido de carbono (CO_2)* de fontes industriais e relacionadas à energia é separado (capturado), condicionado, comprimido e transportado para um local de armazenamento para isolamento de longo prazo da *atmosfera*. Às vezes chamado de Captura e Armazenamento de Carbono. **Veja também:** *Remoções antropogênicas*, *Bioenergia com captura e armazenamento de dióxido de carbono (BECCS)*, *Captura e utilização de dióxido de carbono (CCU)*, *Remoção de dióxido de carbono (CDR)*, *Sequestro*.

Remoção de dióxido de carbono (CDR)
Atividades antropogênicas que removem o *dióxido de carbono (CO_2)* da atmosfera e o armazenam de forma duradoura em reservatórios geológicos, terrestres ou *oceânicos*, ou em produtos. Inclui o aprimoramento *antropogênico* existente e potencial dos *sumidouros* biológicos ou geoquímicos de CO_2 e a captura e armazenamento de dióxido de carbono diretamente do ar (DACCS), mas exclui a *absorção* natural de CO_2 não causada diretamente por atividades humanas. **Veja também:** *Florestamento, Remoções antropogênicas*, *Biochar, Bioenergia com captura e armazenamento de dióxido de carbono (BECCS)*, *Captura e armazenamento de dióxido de carbono (CCS)*, *Intemperismo aprimorado*, *Alcalinização dos oceanos / Aumento da alcalinidade dos oceanos*, *Reflorestamento*, *Sequestro de carbono no solo (SCS)*.

Impactos em cascata
Os impactos em cascata de *eventos climáticos/temporais extremos ocorrem* quando um *perigo* extremo gera uma sequência de eventos secundários em sistemas naturais e *humanos* que resultam em interrupções físicas, naturais, sociais ou econômicas, sendo que o impacto resultante é significativamente maior do que o impacto inicial. Os impactos em cascata são complexos e

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 140

multidimensionais, e estão mais associados à magnitude da *vulnerabilidade* do que à do *perigo*.

Clima
Em um sentido restrito, o clima é geralmente definido como a média do tempo meteorológico ou, mais rigorosamente, como a descrição estatística em termos de média e variabilidade de quantidades relevantes em um período de tempo que varia de meses a milhares ou milhões de anos. O período clássico para o cálculo da média dessas variáveis é de 30 anos, conforme definido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). As quantidades relevantes são, na maioria das vezes, variáveis de superfície, como temperatura, precipitação e vento. O clima, em um sentido mais amplo, é o estado, incluindo uma descrição estatística, do *sistema climático*.

Mudança do clima
Uma mudança no estado do clima que pode ser identificada (por exemplo, por meio de testes estatísticos) por mudanças na média e/ou na variabilidade de suas propriedades e que persiste por um período prolongado, normalmente décadas ou mais. A mudança do clima pode ser decorrente de processos internos naturais ou de forças externas, como modulações dos ciclos solares, erupções vulcânicas e mudanças antropogênicas persistentes na composição da atmosfera ou no uso da terra. **Veja também:** *Variabilidade climática*, *Detecção e atribuição*, *Aquecimento global*, *Variabilidade (climática) natural*, *Acidificação dos oceanos (OA)*.

[Deve-se observar que a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), em seu Artigo 1, define mudança do clima como: "uma mudança climática atribuída direta ou indiretamente à atividade humana que altera a composição da atmosfera global e que se soma à *variabilidade climática natural* observada em períodos de tempo comparáveis". Dessa forma, a UNFCCC faz uma distinção entre a mudança do clima atribuível às atividades humanas que alteram a composição atmosférica e a variabilidade climática atribuível a causas naturais].

Extremo climático (evento climático ou meteorológico extremo)
A ocorrência de um valor de uma variável meteorológica ou *climática* acima (ou abaixo) de um valor limite próximo às extremidades superior (ou inferior) do intervalo de valores observados da variável. Por definição, as características do que é chamado de clima extremo podem variar de local para local em um sentido absoluto. Quando um padrão de *meteorologia extrema* persiste por algum tempo, como uma estação, ele pode ser classificado como um evento climático extremo, especialmente se produzir uma média ou um total que seja extremo (por exemplo, alta temperatura, *seca* ou chuvas fortes ao longo de uma estação). Para simplificar, tanto os eventos meteorológicos extremos quanto os eventos climáticos extremos são chamados coletivamente de "extremos climáticos".

Financiamento climático
Não existe um consenso sobre a definição de financiamento climático. O termo "financiamento climático" é aplicado aos recursos financeiros dedicados ao enfrentamento da *mudança do clima* por todos os atores públicos e privados, da escala global à local, incluindo fluxos financeiros internacionais para *países em desenvolvimento* a fim de ajudá-los a enfrentar a mudança do clima. O financiamento climático visa reduzir as emissões líquidas de gases de efeito estufa e/ou melhorar a *adaptação* e aumentar a *resiliência* aos impactos da mudança do clima atuais e projetadas. O financiamento pode vir de fontes privadas e públicas, canalizado por vários intermediários, sendo fornecido por uma série de instrumentos, incluindo doações, dívidas concessionais e não concessionais e realocações orçamentárias internas.

Governança climática
As estruturas, os processos e as ações por meio dos quais os agentes públicos e privados buscam mitigar e se adaptar à *mudança do clima*.

Justiça climática
Veja: *Justiça*.

Alfabetização climática
A alfabetização climática abrange a conscientização sobre a mudança do clima, causas *antropogênicas* e implicações.

Desenvolvimento resiliente ao clima (CRD)
O desenvolvimento resistente ao clima se refere ao processo de implementação de medidas de *mitigação de gases de efeito estufa* e de *adaptação* para apoiar o *desenvolvimento sustentável* para todos.

Sensibilidade climática
A mudança na temperatura da superfície em resposta a uma mudança na concentração atmosférica de *dióxido de carbono (CO_2)* ou outra força radiativa. **Veja também:** *Parâmetro de feedback climático*.

Sensibilidade climática de equilíbrio (ECS)
A mudança de equilíbrio (estado estável) na temperatura da superfície decorrente da duplicação da concentração atmosférica de *dióxido de carbono (CO_2)* em relação às condições *pré-industriais*.

Serviços climáticos
Os serviços climáticos envolvem o fornecimento de informações climáticas de forma a auxiliar na tomada de decisões. O serviço inclui o envolvimento adequado de usuários e provedores, baseia-se em informações e conhecimentos cientificamente confiáveis, possui um mecanismo de acesso eficaz e atende às necessidades dos usuários.

Sistema climático
O sistema global que consiste em cinco componentes principais: a *atmosfera*, a *hidrosfera*, a *criosfera*, a *litosfera* e a *biosfera*, bem como as interações entre eles. O sistema climático muda ao longo do tempo sob a influência de sua própria dinâmica interna e também devido a forçantes *externas*, como erupções vulcânicas, variações solares, forçantes orbitais e forçantes *antropogênicas*, como a alteração da composição da *atmosfera* e a *mudança do uso da terra*.

Fator de impacto climático (CID)
Condições físicas do *sistema climático* (por exemplo, médias, eventos, extremos) que afetam um elemento da sociedade ou dos *ecossistemas*. Dependendo da tolerância do sistema, os CIDs e suas alterações podem ser prejudiciais, benéficos, neutros ou uma mistura de cada nos elementos e nas *regiões* do sistema que interagem. **Veja também:** *Perigo*, *Impactos*, *Risco*.

Emissão equivalente de CO_2 (CO_2-eq)
A quantidade de emissão de *dióxido de carbono (CO_2)* que teria um efeito equivalente em uma medida-chave específica de *mudança do clima*, em um horizonte de tempo específico, como uma quantidade emitida de outro *gás de efeito estufa (GEE)* ou uma mistura de outros GEEs. Para uma mistura de

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 141

GEEs, é obtida pela soma das emissões equivalentes de CO_2 de cada gás. Há várias maneiras e horizontes de tempo para calcular essas emissões equivalentes (*consulte a métrica de emissão de gases de efeito estufa*). As emissões equivalentes de CO_2 são comumente utilizadas para comparar as emissões de diferentes GEEs, mas não devem ser consideradas como se essas emissões tivessem um efeito equivalente em todas as medidas-chave de *mudança do clima*.

[Nota: de acordo com o Livro de Regras de Paris [Decisão 18/CMA.1, anexo, parágrafo 37], as partes concordaram em utilizar os valores de GWP100 do AR5 do IPCC ou os valores de GWP100 de um Relatório de Avaliação do IPCC subsequente para relatar as emissões e remoções agregadas de GEEs. Além disso, as partes podem utilizar outras métricas para relatar informações suplementares sobre emissões e remoções agregadas de GEEs].

Eventos compostos de meteorologia/clima
Os termos "eventos compostos", "extremos compostos" e "eventos extremos compostos" são utilizados de forma intercambiável na literatura e neste relatório, e se referem à combinação de vários *fatores* e/ou *perigos* que contribuem para o *risco* social e/ou ambiental.

Desmatamento
Conversão de floresta em não-floresta. **Veja também:** *Florestamento*, *Reflorestamento*, *Redução das Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+)*.

[Nota: para uma discussão sobre o termo floresta e termos relacionados, como *florestamento,* reflorestamento e *desmatamento*, consulte as Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa e seu Refinamento de 2019 e as informações fornecidas pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima].

Medidas voltadas para a demanda
Políticas e programas para influenciar a *demanda* por bens e/ou serviços. No setor de energia, as medidas de *mitigação* voltadas para a demanda visam reduzir a quantidade de emissões de *gases de efeito estufa* emitidas por unidade de serviço de energia utilizada.

Países desenvolvidos/em desenvolvimento (países industrializados/desenvolvidos/em desenvolvimento)
Há uma diversidade de abordagens para categorizar os países com base em seu nível de desenvolvimento e para definir termos como industrializado, desenvolvido ou em desenvolvimento. Várias categorizações são utilizadas neste relatório. (1) No sistema das Nações Unidas (ONU), não há uma convenção estabelecida para a designação de países ou áreas desenvolvidas e em desenvolvimento. (2) A Divisão de Estatísticas da ONU especifica as regiões desenvolvidas e em desenvolvimento com base na prática comum. Além disso, países específicos são designados como países menos desenvolvidos, países em desenvolvimento sem litoral, *Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (SIDS)* e economias *em transição*. Muitos países aparecem em mais de uma dessas categorias. (3) O Banco Mundial utiliza a *renda* como o principal critério para classificar os países como de renda baixa, média baixa, média alta e alta. (4) O Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) agrega indicadores de expectativa de vida, nível educacional e *renda* em um único Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) composto para classificar os países como de desenvolvimento humano baixo, médio, alto ou muito alto.

Caminhos de desenvolvimento
Veja: *Caminhos*.

Gestão do risco de desastre (DRM)
Processos para projetar, implementar e avaliar estratégias, políticas e medidas para melhorar a compreensão do *risco de desastres* atual e futuro, fomentar a redução e a transferência do *risco de desastres* e promover a melhoria contínua das práticas de preparação, prevenção e proteção, resposta e recuperação de desastres, com o objetivo explícito de aumentar a *segurança humana*, o *bem-estar*, a qualidade de vida e o *desenvolvimento sustentável (DS)*.

Deslocamento (de seres humanos)
O movimento involuntário, individual ou coletivo, de pessoas de seu país ou comunidade, principalmente devido a conflito armado, distúrbios civis ou desastres naturais ou causados pelo homem.

Seca
Um período excepcional de escassez de água para os *ecossistemas* existentes e para a população humana (devido à baixa precipitação, alta temperatura e/ou vento). **Veja também:** *Estresse evaporativo das plantas*.

Seca agrícola e ecológica
Dependendo do *bioma* afetado: um período com déficit anormal de *umidade no solo*, resultante da combinação de escassez de precipitação e excesso de *evapotranspiração*, que durante a estação de crescimento afeta a produção agrícola ou a função do ecossistema em geral.

Sistemas de alerta precoce (EWS)
O conjunto de capacidades técnicas e institucionais para prever, predizer e comunicar informações de alerta oportunas e significativas para permitir que indivíduos, comunidades, *ecossistemas* gerenciados e organizações ameaçadas por um *perigo* se preparem para agir pronta e adequadamente a fim de reduzir a possibilidade de danos ou perdas. Dependendo do contexto, o EWS pode se basear no conhecimento científico e/ou *indígena* e em outros tipos de conhecimento. Os EWS também são considerados para aplicações ecológicas, por exemplo, conservação, em que a organização em si não é ameaçada pelo *perigo*, mas o *ecossistema* sob conservação é (por exemplo, alertas de *branqueamento de corais*), na agricultura (por exemplo, alertas de chuvas fortes, *secas*, geadas e granizo) e na pesca (por exemplo, alertas de tempestades, *marés de tempestade* e tsunamis).

Seca ecológica
Veja: *Seca*.

Ecossistema
Um ecossistema é uma unidade funcional composta por organismos vivos, seu ambiente não vivo e as interações dentro e entre eles. Os componentes incluídos em um determinado ecossistema e seus limites espaciais dependem da finalidade para a qual o ecossistema é definido: em alguns casos, eles são relativamente nítidos, enquanto em outros são difusos. Os limites do ecossistema podem mudar com o tempo. Os ecossistemas estão aninhados em outros ecossistemas e sua escala pode variar de muito pequena a toda a *biosfera*. Na era atual, a maioria dos ecossistemas contém pessoas como organismos-chave ou é influenciada pelos efeitos das atividades humanas em seu ambiente. **Veja também:** *Saúde do ecossistema*, *Serviços ecossistêmicos*.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 142

Adaptação baseada em ecossistemas (AbE)
O uso de *atividades de gestão de ecossistemas* para aumentar *a resiliência* e reduzir *a vulnerabilidade* das pessoas e dos *ecossistemas* à *mudança do clima*. **Veja também:** *Adaptação*, *Soluções baseadas na natureza (SbN)*.

Serviços ecossistêmicos
Processos ou funções ecológicas com valor monetário ou não monetário para indivíduos ou para a sociedade em geral. São frequentemente classificados como (1) serviços de apoio, como produtividade ou manutenção da *biodiversidade*, (2) serviços de abastecimento, como alimentos ou fibras, (3) serviços de regulação, como regulação climática ou *sequestro de carbono*, e (4) serviços culturais, como turismo ou valorização espiritual e estética. **Veja também:** *Ecossistema*, *Saúde do ecossistema*, *Contribuições da natureza para as pessoas (CNP)*.

Cenário de emissões
Veja: *Cenário*.

Caminhos de emissão
Veja: *Caminhos*.

Condições **favoráveis (para opções de adaptação e mitigação)**
Condições que aumentam a *viabilidade* das opções de *adaptação* e *mitigação*. As *condições favoráveis* incluem financiamento, inovação tecnológica, fortalecimento dos instrumentos de política, *capacidade institucional*, *governança em vários níveis* e *mudanças no comportamento humano* e nos estilos de vida.

Igualdade
Princípio que atribui valor igual a todos os seres humanos, incluindo oportunidades, direitos e obrigações iguais, independentemente de suas origens. **Veja também:** *Equidade*, *Equalidade*.

Desigualdade
Oportunidades e posições sociais desiguais e processos de discriminação dentro de um grupo ou sociedade, com base em gênero, classe, etnia, idade e (des)habilidade, geralmente produzidos por um desenvolvimento desigual. A desigualdade de renda se refere às diferenças entre as pessoas com renda mais alta e mais baixa em um país e entre países.

Sensibilidade climática de equilíbrio (ECS)
Veja: *Sensibilidade climática*.

Equidade
O princípio de ser justo e imparcial, e uma base para entender como os *impactos* e as respostas à mudança do clima, incluindo custos e benefícios, são distribuídos em e pela sociedade de forma mais ou menos igualitária. Frequentemente alinhada com ideias de *igualdade*, equalidade e *justiça* e aplicada com relação à equidade na responsabilidade e na distribuição dos *impactos* climáticos e das políticas entre a sociedade, gerações e gênero, bem como no sentido de quem participa em e controla os processos de tomada de decisões.

Exposição
A presença de pessoas, meios de subsistência, espécies ou ecossistemas, funções, serviços e ativos ambientais, *infraestrutura* ou ativos econômicos, sociais ou culturais em locais e ambientes que podem ser afetados negativamente. **Veja também:** *Perigo, Exposição*, *Vulnerabilidade*, *Impactos*, *Risco*.

Viabilidade
Neste relatório, a viabilidade se refere ao potencial de implementação de uma opção de *mitigação* ou *adaptação*. Os fatores que influenciam a viabilidade dependem do contexto, são temporalmente dinâmicos e podem variar entre diferentes grupos e atores. A viabilidade depende de fatores geofísicos, ambientais e ecológicos, tecnológicos, econômicos, socioculturais e institucionais que possibilitam ou restringem a implementação de uma opção. A viabilidade das opções pode mudar quando diferentes opções são combinadas e aumentar quando as *condições favoráveis* são fortalecidas. **Veja também:** *Condições favoráveis (para opções de adaptação e mitigação)*.

Clima de incêndio
Condições climáticas propícias ao desencadeamento e à manutenção de incêndios florestais, geralmente com base em um conjunto de indicadores e combinações de indicadores, incluindo temperatura, *umidade do solo*, umidade e vento. O clima de incêndio não inclui a presença ou ausência de carga de combustível.

Perda e desperdício de alimentos
A diminuição da quantidade ou qualidade dos alimentos. O desperdício de alimentos faz parte da perda de alimentos e se refere ao descarte ou ao uso alternativo (não alimentar) de alimentos seguros e nutritivos para o consumo humano ao longo de toda a cadeia de fornecimento de alimentos, desde a produção primária até o nível do consumidor doméstico final. O desperdício de alimentos é reconhecido como uma parte distinta da perda de alimentos porque os fatores que o geram e as soluções para tal são diferentes daqueles de perda de alimentos.

Segurança alimentar
Situação em que todas as pessoas, em todos os momentos, têm acesso físico, social e econômico a alimentos suficientes, seguros e nutritivos que atendam às suas necessidades dietéticas e preferências alimentares para uma vida ativa e saudável. Os quatro pilares da segurança alimentar são a disponibilidade, o acesso, a utilização e a estabilidade. A dimensão nutricional é parte integrante do conceito de segurança alimentar.

Aquecimento global
Aquecimento global se refere ao aumento da temperatura da superfície global em relação a um *período de referência* de linha de base, sendo a média em um período de tempo suficiente para remover variações interanuais (por exemplo, 20 ou 30 anos). Uma escolha comum para a linha de base é 1850–1900 (o período mais antigo de observações confiáveis com cobertura geográfica suficiente), com linhas de base mais modernas sendo utilizadas dependendo da aplicação. **Veja também:** *Mudança do clima*, *Variabilidade climática*, *Variabilidade (climática) natural*.

Potencial de aquecimento global (GWP)
Um índice que mede o *forçamento radiativo* após a emissão de uma unidade de massa de uma determinada substância, acumulada em um horizonte de tempo selecionado, em relação à substância de referência, o dióxido de carbono (CO_2). O GWP representa, portanto, o efeito combinado dos diferentes tempos em que essas substâncias permanecem na *atmosfera* e sua eficácia em causar forçamento radiativo. **Veja também:** *Tempo de vida*, *Métrica de emissões de gases de efeito estufa*.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 143

Infraestrutura verde
Veja: *Infraestrutura*.

Gases de efeito estufa (GEEs)
Constituintes gasosos da *atmosfera*, tanto naturais quanto *antropogênicos*, que absorvem e emitem radiação em comprimentos de onda específicos dentro do espectro de radiação emitido pela superfície da Terra, pela própria atmosfera e pelas nuvens. Essa propriedade causa o *efeito estufa*. O vapor de água (H2O), o dióxido de carbono (CO_2), o óxido nitroso (N_2O), o *metano* (CH_4) e o *ozônio* (O3) são os principais *GEEs* presentes na atmosfera da Terra. Os GEEs produzidos pelo homem incluem o *hexafluoreto de enxofre* (SF6), os *hidrofluorcarbonos* (HFCs), os *clorofluorcarbonos* (CFCs) e os perfluorcarbonos (PFCs); vários deles também destroem o O3 (e são regulamentados pelo *Protocolo de Montreal*). **Veja também:** *Gás de efeito estufa bem misturado*.

Infraestrutura cinza
Veja: *Infraestrutura*.

Perigo
A ocorrência potencial de um evento ou tendência física natural ou induzida pelo homem que pode causar perda de vidas, lesões ou outros impactos à *saúde*, bem como danos e perdas de propriedade, *infraestrutura*, *meios de subsistência*, prestação de serviços, *ecossistemas* e recursos ambientais. **Veja também:** *Exposição*, *Vulnerabilidade*, *Impactos*, *Risco*.

Impactos
As consequências dos *riscos* percebidos nos sistemas naturais e *humanos*, onde os *riscos* resultam das interações de *perigos* relacionados ao clima (incluindo *eventos climáticos/meteorológicos extremos*), *exposição* e *vulnerabilidade*. Os *impactos* geralmente se referem aos efeitos sobre vidas, *meios de subsistência*, *saúde* e *bem-estar*, *ecossistemas* e espécies, ativos econômicos, sociais e culturais, serviços (incluindo *serviços ecossistêmicos*) e *infraestrutura*. Os *impactos* podem ser referidos como consequências ou resultados e podem ser adversos ou benéficos. **Veja também:** *Adaptação*, *Perigo, Exposição*, *Vulnerabilidade*, *Risco*.

Desigualdade
Veja também: *Igualdade*.

Conhecimento indígena (CI)
As compreensões, habilidades e filosofias desenvolvidas por sociedades com longas histórias de interação com seus ambientes naturais. Para muitos *povos indígenas*, o CI informa a tomada de decisões sobre aspectos fundamentais da vida, desde atividades cotidianas até ações de longo prazo. Esse conhecimento é parte integrante de complexos culturais, que também abrangem linguagem, sistemas de classificação, práticas de uso de recursos, interações sociais, valores, rituais e espiritualidade. Essas formas distintas de conhecimento são aspectos importantes da diversidade cultural do mundo. **Vide:** *Conhecimento local (CL)*.

Povos Indígenas
Povos e nações indígenas são aqueles que, tendo uma continuidade histórica com as sociedades pré-invasão e pré-coloniais que se desenvolveram em seus territórios, consideram-se distintos de outros setores das sociedades que agora prevalecem nesses territórios ou em partes deles. Atualmente, eles formam principalmente setores não dominantes da sociedade e, muitas vezes, estão determinados a preservar, desenvolver e transmitir às gerações futuras seus territórios ancestrais e sua identidade étnica, como base em sua contínua existência como povos, de acordo com seus próprios padrões culturais, instituições sociais e sistema de direito comum.

Assentamento informal
Termo dado a *assentamentos* ou áreas residenciais que, por pelo menos um critério, encontram-se fora do escopo de regras e regulamentações oficiais. A maioria dos assentamentos informais tem moradias precárias (com uso generalizado de materiais temporários) e são desenvolvidos em terras ocupadas ilegalmente, com altos níveis de superlotação. Na maioria desses assentamentos, o fornecimento de água potável, saneamento, rede de esgoto, estradas pavimentadas e serviços básicos é inadequado ou inexistente. O termo 'favela' é frequentemente utilizado para assentamentos informais, embora seja enganoso, pois muitos assentamentos informais se transformam em áreas residenciais de boa qualidade, especialmente quando os governos apoiam o desenvolvimento.

Infraestrutura
O conjunto de sistemas físicos projetados e construídos e os arranjos institucionais correspondentes que fazem a mediação entre as pessoas, suas comunidades e o ambiente mais abrangente para fornecer serviços que apoiam o crescimento econômico, a *saúde*, a qualidade de vida e a segurança.

Infraestrutura azul
A infraestrutura azul inclui corpos d'água, cursos d'água, lagoas, lagos e drenagem pluvial que fornecem funções ecológicas e hidrológicas, incluindo *evaporação*, transpiração, *drenagem*, infiltração e armazenamento temporário de *escoamento* e descarga.

Infraestrutura verde
O conjunto interconectado estrategicamente planejado de sistemas ecológicos naturais e construídos, espaços verdes e outras características da paisagem que podem fornecer funções e serviços, incluindo purificação do ar e da água, gestão da temperatura, gestão de enchentes e defesa costeira, muitas vezes com *co-benefícios* para as pessoas e para a *biodiversidade*. A infraestrutura verde inclui vegetação nativa plantada e remanescente, solos, *zonas úmidas*, parques e espaços verdes abertos, bem como intervenções de projeto no nível dos edifícios e das ruas que incorporam a vegetação.

Infraestrutura cinza
Componentes físicos e redes de tubulações, fios, trilhos e estradas projetados que sustentam os sistemas de energia, transporte, comunicações (inclusive digitais), formas construídas, água e saneamento e gestão de resíduos sólidos.

Irreversibilidade
Um estado perturbado de um *sistema dinâmico* é definido como irreversível em uma determinada escala de tempo se a recuperação desse estado devido a processos naturais demorar muito mais do que a escala de tempo de interesse. **Veja também:** *Ponto de inflexão*.

Transição justa
Veja também: *Transição*.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 144

Justiça
Justiça se refere à garantia de que as pessoas recebam o que lhes é devido, estabelecendo os princípios morais ou legais de *integridade* e *equidade* na forma como as pessoas são tratadas, geralmente com base na ética e nos valores da sociedade.

Justiça climática
Justiça que conecta o desenvolvimento e os *direitos humanos* a fim de alcançar uma abordagem centrada no ser humano para lidar com a *mudança do clima*, protegendo os direitos das pessoas mais vulneráveis e compartilhando o ônus e os benefícios da mudança do clima e seus *impactos* de forma igualitária e justa.

Justiça social
Relações justas ou igualitárias dentro da sociedade que buscam abordar a distribuição de riqueza, acesso a recursos, oportunidades e apoio de acordo com os princípios de *justiça* e *equalidade*.

Risco-chave
Veja também: *Risco*.

Uso da terra, mudança do uso de terra e florestas (LULUCF)
No contexto dos inventários nacionais de *gases de efeito estufa* (GEE) no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, o LULUCF é um setor de inventário de GEE que abrange as emissões e *remoções antropogênicas* de GEE em terras administradas, excluindo as emissões agrícolas que não de CO_2. De acordo com as Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários Nacionais de GEE e seu Refinamento de 2019, os fluxos de GEE '*antropogênicos*' relacionados à terra são definidos como todos aqueles que ocorrem em '*terras administradas*', ou seja, 'onde intervenções e práticas humanas foram aplicadas para realizar funções produtivas, ecológicas ou sociais'. Como terras administradas podem incluir remoções de *dióxido de carbono* (CO_2) não consideradas '*antropogênicas*' em parte da literatura científica avaliada neste relatório (por exemplo, remoções associadas à fertilização com CO_2 e à deposição de N), as estimativas de emissões líquidas de *GEE* relacionadas à terra dos modelos globais incluídos neste relatório não são necessariamente diretamente comparáveis às estimativas do LULUCF nos Inventários Nacionais de GEE *(IPCC 2006, 2019)*.

Países Menos Desenvolvidos (LDCs)
Uma lista de países designados pelo Conselho Econômico e Social das Nações Unidas (ECOSOC) que atendem a três critérios: (1) um critério de baixa *renda* abaixo de um determinado limite de renda nacional bruta per capita entre USD 750 e USD 900; (2) uma deficiência de recursos humanos com base em indicadores de *saúde*, educação e alfabetização de adultos; e (3) uma fragilidade devido à vulnerabilidade econômica com base em indicadores de instabilidade da produção agrícola, instabilidade da exportação de bens e serviços, importância econômica de atividades não tradicionais, concentração de exportação de mercadorias e a desvantagem devido à pequenez econômica. Os países dessa categoria se qualificam para vários programas focados na assistência de países mais necessitados. Esses privilégios incluem certos benefícios de acordo com os artigos da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC).

Meios de subsistência
Os recursos utilizados e as atividades realizadas para que as pessoas subsistam. Os *meios de subsistência* geralmente são determinados pelos direitos e ativos aos quais as pessoas têm acesso. Esses ativos podem ser categorizados como humanos, sociais, naturais, físicos ou financeiros.

Conhecimento local (CL)
As compreensões e habilidades desenvolvidas por indivíduos e populações, específicos aos locais onde vivem. O conhecimento local informa a tomada de decisões sobre aspectos fundamentais da vida, desde atividades cotidianas até ações de longo prazo. Esse conhecimento é um elemento fundamental dos sistemas sociais e culturais que influenciam as observações e as respostas à *mudança do clima*; ele também informa as decisões *de governança*. **Veja também:** *Conhecimento indígena (CI)*.

Aprisionamento (Lock-in)
Situação em que o desenvolvimento futuro de um sistema, incluindo *infraestrutura*, tecnologias, investimentos, instituições e normas comportamentais, é determinado ou restringido ("preso") por desenvolvimentos históricos. **Veja também:** *Dependência de trajetória*.

Perdas e Danos, e perdas e danos
A pesquisa considerou *Perdas e Danos* (em letras maiúsculas) para se referir ao debate político no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) após o estabelecimento do Mecanismo de Varsóvia sobre Perdas e Danos em 2013, que tem como objetivo 'lidar com as perdas e danos associados aos impactos da *mudança do clima*, incluindo *eventos extremos* e eventos de início lento, em *países em desenvolvimento* particularmente vulneráveis aos efeitos adversos da mudança do clima". Letras minúsculas *(perdas e danos)* foram utilizadas para se referir amplamente aos danos causados por *impactos* (observados) e riscos (projetados), podendo ser econômicos ou não econômicos.

Resultados de baixa probabilidade e alto impacto
Resultados/eventos cuja probabilidade de ocorrência é baixa ou não é bem conhecida (como no contexto de *profunda incerteza*), mas cujos *impactos* potenciais à sociedade e aos *ecossistemas* podem ser altos. Para melhor informar a *avaliação de riscos* e a tomada de decisões, esses resultados de baixa *probabilidade* são considerados se estiverem associados a consequências muito importantes e, portanto, que podem constituir riscos materiais, mesmo que essas consequências não necessariamente representem o resultado mais provável. **Veja também:** *Impactos*.

Ações desadaptativas (Desadaptação)
Ações que podem levar ao aumento do risco de resultados adversos relacionados ao clima, inclusive por meio do aumento *das emissões de gases de efeito estufa (GEE)*, aumento ou deslocamento da *vulnerabilidade* à *mudança do clima*, resultados mais desiguais ou diminuição do bem-estar, no presente ou no futuro. Na maioria das vezes, a desadaptação é uma consequência não intencional.

Migração (de seres humanos)
Movimento de uma pessoa ou de um grupo de pessoas através de uma fronteira internacional ou dentro de um Estado. É um movimento populacional que abrange qualquer tipo de movimento de pessoas, independentemente de sua duração, composição e causas; inclui a migração de refugiados, deslocados, migrantes econômicos e pessoas em movimento por outros motivos, incluindo a reunificação familiar.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 145

Mitigação (da mudança do clima)
Uma intervenção humana para reduzir as emissões ou aumentar os *sumidouros* de *gases de efeito estufa*.

Potencial de mitigação
A quantidade de reduções líquidas de emissões de *gases de efeito estufa* que pode ser alcançada por uma determinada *opção de mitigação* em relação a linhas de base de emissões especificadas. **Veja também:** *Potencial de sequestro*.

[Nota: a redução líquida de emissões de gases de efeito estufa é a soma das emissões reduzidas e/ou dos *sumidouros* aprimorados]

Variabilidade (climática) natural
A variabilidade natural se refere às flutuações climáticas que ocorrem sem nenhuma influência humana, ou seja, *variabilidade interna* combinada com a resposta a fatores naturais externos, como erupções vulcânicas, mudanças na *atividade solar* e, em escalas de tempo mais longas, efeitos orbitais e tectônica de placas. **Veja também:** *Forçamento orbital*.

Emissões líquidas zero de CO_2
Condição na qual *as emissões antropogênicas de dióxido de carbono (CO_2)* são equilibradas pelas *remoções antropogênicas de CO_2* durante um período específico. **Veja também:** *Neutralidade de carbono*, *Uso da terra, mudança do uso da terra e florestas (LULUCF)*, *Emissões líquidas zero de gases de efeito estufa*.

[Nota: *neutralidade de carbono* e emissões líquidas zero de CO_2 são conceitos que se sobrepõem. Os conceitos podem ser aplicados em escalas global ou sub-globais (por exemplo, regional, nacional e subnacional). Em escala global, os termos neutralidade de carbono e emissões líquidas zero de CO_2 são equivalentes. Em escalas sub-globais, emissões líquidas zero de CO_2 são geralmente aplicadas a emissões e remoções sob controle direto ou responsabilidade territorial da entidade declarante, enquanto neutralidade de carbono geralmente inclui emissões e remoções dentro e fora do controle direto

Reflorestamento
Conversão para floresta de terras que anteriormente continham florestas, mas que foram convertidas para algum outro uso. **Veja também:** *Florestamento*, *Remoções antropogênicas*, *Remoção de dióxido de carbono (CDR)*, *Desmatamento*, *Redução das Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+)*.

[Nota: para uma discussão sobre o termo floresta e termos relacionados, como *florestamento*, *reflorestamento* e *desmatamento*, consulte as Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa e seu Refinamento de 2019 e as informações fornecidas pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima].

Risco residual
O risco relacionado aos *impactos da mudança do clima* que permanece após os esforços de *adaptação* e *mitigação*. As ações de *adaptação* podem redistribuir os *riscos* e *impactos*, com aumento de *riscos* e *impactos* em algumas áreas ou populações, e diminuição de *riscos* e *impactos* em outras. **Veja também:** *Perdas e Danos*, *perdas e danos*.

Resiliência
A capacidade dos sistemas sociais, econômicos e ecológicos interconectados de lidar com um evento perigoso, tendência ou distúrbio, respondendo ou se reorganizando de forma a manter sua função, identidade e estrutura essenciais. A resiliência é um atributo positivo quando mantém a capacidade de *adaptação*, aprendizado e/ou *transformação*. **Veja também:** *Perigo*, *Risco*, *Vulnerabilidade*.

Restauração
No contexto ambiental, a *restauração* envolve intervenções humanas para ajudar na recuperação de um *ecossistema* que tenha sido previamente degradado, danificado ou destruído.

Risco
O potencial de consequências adversas para sistemas humanos ou ecológicos, reconhecendo a diversidade dos valores e objetivos associados a esses sistemas. No contexto da *mudança do clima*, os *riscos* podem surgir dos possíveis *impactos* da *mudança do clima*, bem como das respostas humanas à *mudança do clima*. Consequências adversas relevantes incluem aquelas sobre vidas, *meios de subsistência*, *saúde* e *bem-estar*, ativos e investimentos econômicos, sociais e culturais, *infraestrutura*, serviços (incluindo *serviços ecossistêmicos*), *ecossistemas* e espécies.
No contexto dos *impactos da mudança do clima*, os *riscos* resultam de interações dinâmicas entre os *perigos* relacionados ao clima com a *exposição* e a *vulnerabilidade* do sistema humano ou ecológico afetado aos *perigos*. Os *perigos*, a *exposição* e a *vulnerabilidade* podem estar sujeitos à *incerteza* em termos de magnitude e *probabilidade* de ocorrência, e cada um deles pode mudar ao longo do tempo e espaço devido a mudanças socioeconômicas e às tomadas de decisões humanas.
No contexto das *respostas à mudança* do clima, os *riscos* resultam da possibilidade de tais respostas não atingirem o(s) objetivo(s) pretendido(s), ou de possíveis *trade-offs* ou efeitos colaterais negativos em outros objetivos sociais, como os *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)*. *Riscos* podem surgir, por exemplo, da *incerteza* na implementação, na eficácia ou nos resultados da *política climática*, de investimentos relacionados ao clima, do desenvolvimento ou adoção de tecnologias e das *transições* de sistemas.
Veja também: *Perigo*, *Exposição*, *Vulnerabilidade*, *Impactos*, *Gestão de riscos, Adaptação*, *Mitigação*.

Risco-chave
Os *riscos-chave* têm consequências adversas potencialmente graves para os seres humanos e sistemas socioecológicos resultantes da interação de *perigos* relacionados ao clima com as *vulnerabilidades* das sociedades e dos sistemas expostos.

Cenário
Uma descrição plausível de como o futuro pode se desenvolver com base em um conjunto coerente e internamente consistente de suposições sobre os principais fatores impulsionadores (por exemplo, taxa de mudança tecnológica, preços) e relações. Deve-se observar que os cenários não são *previsões* nem *prognósticos*, mas sim utilizados para fornecer uma visão das implicações de desenvolvimentos e ações. **Veja também:** *Cenário*, *Narrativa de cenário*.

Cenário de emissões
Uma representação plausível do desenvolvimento futuro das emissões de substâncias radiativamente ativas (por exemplo, *gases de efeito*

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 146

estufa (GEEs) ou *aerossóis*) com base em um conjunto coerente e internamente consistente de suposições sobre fatores impulsionadores (como desenvolvimento demográfico e socioeconômico, mudança tecnológica, energia e *uso da terra*) e suas principais relações. Os cenários de concentração, derivados dos *cenários de emissão*, são frequentemente utilizados como entrada em um *modelo climático* para calcular as *projeções* climáticas.

Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastre
O *Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres 2015-2030* define sete metas claras e quatro prioridades de ação para evitar novos *riscos de desastres* e reduzir os já existentes. O acordo voluntário e não vinculativo reconhece que o Estado tem a função primária de reduzir o risco de desastres, mas que a responsabilidade deve ser compartilhada com outras partes interessadas, incluindo o governo local, o setor privado e outras partes interessadas, com o objetivo de reduzir substancialmente o risco de desastres e as perdas de vidas, *meios de subsistência* e *saúde*, bem como os ativos econômicos, físicos, sociais, culturais e ambientais de pessoas, empresas, comunidades e países.

Assentamentos
Locais de habitação humana concentrada. Os *assentamentos* podem variar de vilarejos rurais isolados a regiões *urbanas* com influência global significativa. Eles podem incluir habitações formais planejadas e informais ou ilegais e a *infraestrutura* relacionada. **Veja também:** *Cidades*, *Urbano*, *Urbanização*.

Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSPs)
Veja também: *Caminhos*

Mudança nos caminhos de desenvolvimento (SDPs)
Neste relatório, mudança nos caminhos do desenvolvimento descreve as *transições* destinadas a redirecionar as tendências de desenvolvimento existentes. As sociedades podem criar *condições favoráveis* para influenciar seus futuros *caminhos de desenvolvimento*, quando se esforçam para alcançar determinados resultados. Alguns resultados podem ser comuns, enquanto outros podem ser específicos ao contexto, considerando diferentes pontos de partida. **Veja também:** *Caminhos de desenvolvimento*, *Mudança nos caminhos de desenvolvimento para a sustentabilidade*.

Sumidouro
Qualquer processo, atividade ou mecanismo que remova um gás de efeito estufa, um aerossol ou um precursor de um gás de efeito estufa da *atmosfera*. **Veja também:** *Estoque - Carbono e nitrogênio*, *Reservatório*, *Sequestro*, *Potencial de sequestro*, *Fonte*, *Absorção*.

Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (SIDS)
Os Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (SIDS), conforme reconhecido pelo OHRLLS (Escritório do Alto Representante das Nações Unidas para os *Países Menos Desenvolvidos*, Países em Desenvolvimento Sem Litoral e Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento), são um grupo distinto de países em desenvolvimento que enfrentam vulnerabilidades sociais, econômicas e ambientais específicas. Eles foram reconhecidos como um caso especial tanto pelo seu meio ambiente quanto pelo seu desenvolvimento na Cúpula da Terra no Rio de Janeiro, Brasil, em 1992. Cinquenta e oito países e territórios são atualmente classificados como SIDS pelo OHRLLS da ONU, sendo 38 estados membros da ONU e 20 não membros da ONU ou membros associados das Comissões Regionais.

Justiça social
Veja: *Justiça*.

Proteção social
No contexto da ajuda ao desenvolvimento e da política climática, a proteção social geralmente descreve iniciativas públicas e privadas que fornecem transferências de *renda* ou consumo para os pobres, protegem os vulneráveis contra *riscos a subsistência* e melhoram o status social e os direitos dos marginalizados, com o objetivo geral de reduzir a *vulnerabilidade* econômica e social de grupos pobres, vulneráveis e marginalizados. Em outros contextos, a proteção social pode ser utilizada como sinônimo de política social e descrita como todas as iniciativas públicas e privadas que fornecem acesso a serviços, como *saúde*, educação ou moradia, ou transferências de renda e consumo para as pessoas. As políticas de proteção social protegem os pobres e *vulneráveis* contra os *riscos* a subsistência e melhoram o status social e os direitos dos marginalizados, além de evitar que as pessoas *vulneráveis* caiam na pobreza.

Modificação da radiação solar (SRM)
Refere-se a uma série de medidas de modificação de radiação não relacionadas à *mitigação de gases de efeito estufa (GEE)* que buscam limitar o *aquecimento global*. A maioria dos métodos envolve a redução da quantidade de *radiação solar* que chega à superfície, mas outros também atuam no orçamento de radiação de ondas longas, reduzindo a espessura óptica e a vida útil das nuvens.

Fonte
Qualquer processo ou atividade que libere um *gás de efeito estufa*, um *aerossol* ou um precursor de um gás de efeito estufa na *atmosfera*. **Veja também:** *Estoque - carbono e nitrogênio*, *Reservatório*, *Sequestro*, *Potencial de sequestro*, *Sumidouro*, *Absorção*.

Ativos ociosos
Ativos expostos a desvalorizações ou conversão em "passivos" em decorrência de mudanças imprevistas em suas receitas inicialmente esperadas devido a inovações e/ou evoluções do contexto comercial, incluindo mudanças nas regulamentações públicas a nível nacional e internacional.

Desenvolvimento sustentável (DS)
Desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer as suas próprias necessidades e que equilibra as preocupações sociais, econômicas e ambientais. **Veja também:** *Caminhos de desenvolvimento*, *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)*.

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)
Os 17 Objetivos Globais de desenvolvimento para todos os países, estabelecidos pelas Nações Unidas por meio de um processo participativo e elaborados na *Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*, incluindo a erradicação da pobreza e da fome; garantia da saúde e *bem-estar*, educação, igualdade de gênero, água potável e energia e trabalho decente; construção e garantia de *infraestrutura*, cidades e consumo resilientes e sustentáveis; redução das *desigualdades*; proteção dos *ecossistemas* terrestres e aquáticos; promoção da paz, *justiça* e parcerias; e ações urgentes contra a *mudança do clima*. **Veja também:** *Caminhos de desenvolvimento*, *Desenvolvimento sustentável (DS)*.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 147

Gestão sustentável da terra
A administração e o uso dos recursos *terrestres*, incluindo solos, água, animais e plantas, para atender às necessidades humanas em constante mudança e, ao mesmo tempo, garantir o potencial produtivo de longo prazo desses recursos e a manutenção de suas funções ambientais.

Ultrapassagem da temperatura
Excedência de um nível de *aquecimento global* especificado, seguido de um declínio para esse nível ou abaixo dele durante um período de tempo especificado (por exemplo, antes de 2100). Às vezes, são também caracterizadas a magnitude e a probabilidade da ultrapassagem. A duração da ultrapassagem pode variar de um *caminho* para outro, mas na maioria dos *caminhos de ultrapassagem* na literatura e referidas como "caminhos de ultrapassagem" no AR6, a ultrapassagem ocorre em um período de pelo menos uma e até várias décadas. **Veja também:** *Caminhos de ultrapassagem*.

Ponto de inflexão
Um limite crítico além do qual um sistema se reorganiza, geralmente de forma abrupta e/ou irreversível. **Veja também:** *Mudança abrupta do clima*, *Irreversibilidade*, *Elemento de inflexão*.

Transformação
Uma mudança nos atributos fundamentais dos *sistemas naturais* e *humanos*.

Adaptação transformacional
Veja também: *Adaptação*.

Transição
O processo de mudança de um estado ou condição para outro em um determinado período de tempo. A transição pode ocorrer em indivíduos, empresas, *cidades*, *regiões* e nações, e pode se basear em mudanças incrementais ou *transformadoras*.

> ***Transições justas***
> Conjunto de princípios, processos e práticas que visam garantir que nenhuma pessoa, trabalhador, lugar, setor, país ou região seja deixado para trás na *transição* de uma economia de alto carbono para uma economia de baixo carbono. Enfatiza a necessidade de medidas direcionadas e proativas por parte de governos, agências e autoridades para garantir que quaisquer impactos sociais, ambientais ou econômicos negativos das transições em toda a economia sejam minimizados, ao mesmo tempo em que os benefícios sejam maximizados para as pessoas afetadas de forma desproporcional. Os princípios-chave das transições justas incluem: respeito e dignidade para grupos vulneráveis; *equidade* no acesso e uso da energia, diálogo social e consulta democrática com as partes interessadas relevantes; criação de empregos decentes; *proteção social*; e direitos no trabalho. As transições justas podem incluir a equidade nos processos de planejamento e tomada de decisões sobre energia, *uso da terra* e clima;

diversificação econômica com base em investimentos de baixo carbono; programas realistas de treinamento/reciclagem que levem ao trabalho decente; políticas específicas de gênero que promovam resultados equitativos; promoção da cooperação internacional e ações multilaterais coordenadas; e erradicação da pobreza. Por fim, as transições justas podem incorporar a reparação de danos passados e injustiças percebidas.

Urbano
A categorização de áreas como "urbanas" pelos departamentos de estatística do governo geralmente se baseia no tamanho da população, na densidade populacional, na base econômica, no fornecimento de serviços ou em alguma combinação dos itens acima. Os sistemas urbanos são redes e nós de intensa interação e troca, incluindo capital, cultura e objetos materiais. As áreas urbanas existem como continuação das áreas rurais e tendem a apresentar níveis mais altos de complexidade, populações e densidade populacional mais altas, intensidade de investimento de capital e uma preponderância de indústrias dos setores secundário (processamento) e terciário (serviços). A extensão e intensidade dessas características variam significativamente dentro das áreas urbanas e entre elas. Os locais e sistemas urbanos são abertos, com muito movimento e intercâmbio entre áreas mais rurais e outras regiões urbanas. As áreas urbanas podem ser interconectadas globalmente, facilitando fluxos rápidos entre elas de investimento de capital, de ideias e cultura, *migração* humana *e* doenças. **Veja também:** *Cidades*, *Região da cidade*, Áreas periurbanas, *Sistemas urbanos*, *Urbanização*.

Urbanização
A *urbanização* é um processo multidimensional que envolve pelo menos três mudanças simultâneas: 1) *mudança no uso da terra*: transformação de antigos *assentamentos* rurais ou terras naturais em *assentamentos urbanos*; 2) mudança demográfica: uma mudança na distribuição espacial de uma população de áreas rurais para áreas *urbanas*; e 3) mudança de *infraestrutura*: um aumento no fornecimento de serviços de *infraestrutura*, incluindo eletricidade, saneamento, etc. A *urbanização* geralmente inclui mudanças no estilo de vida, na cultura e no comportamento e, portanto, altera a estrutura demográfica, econômica e social das áreas urbanas e rurais. **Veja também:** *Assentamento*, *Urbano*, *Sistemas Urbanos*.

Doenças transmitidas por vetores
Doenças causadas por parasitas, vírus e bactérias que são transmitidos por diversos vetores (por exemplo, mosquitos, flebótomos, triatomíneos, moscas-negras, carrapatos, moscas tsé-tsé, ácaros, caracóis e piolhos).

Vulnerabilidade
A propensão ou predisposição para ser afetado negativamente. A vulnerabilidade abrange uma variedade de conceitos e elementos, incluindo sensibilidade ou suscetibilidade a danos e falta de capacidade de enfrentamento e adaptação. **Veja também:** *Perigo*, *Exposição*, *Impactos*, *Risco*.

Segurança hídrica
A capacidade de uma população de proteger o acesso sustentável a quantidades adequadas de água de qualidade aceitável para sustentar os *meios de subsistência*, o *bem-estar* humano e o desenvolvimento socioeconômico, a fim de garantir a proteção contra a poluição transmitida pela água e os desastres relacionados à água e preservar os *ecossistemas* em um clima de paz e estabilidade política.

Bem-estar
Um estado de existência que atende a várias necessidades humanas, incluindo condições materiais de vida e qualidade de vida, bem como a capacidade de buscar objetivos próprios, prosperar e se sentir satisfeito com a vida. O bem-estar do ecossistema se refere à capacidade dos *ecossistemas* de manter sua diversidade e qualidade.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 149

Anexo II
Acrônimos, Símbolos Químicos e Unidades Científicas

Equipe Editorial

Andreas Fischlin (Suíça), Yonhung Jung (Coreia do Sul), Noëmie Leprince-Ringuet (França), Chloé Ludden (Alemanha/França), Clotilde Péan (França), José Romero (Suíça)

Este anexo deve ser citado como: IPCC, 2023: Annex II: Acronyms, Chemical Symbols and Scientific Units [Fischlin, A., Y. Jung, N. Leprince-Ringuet, C. Ludden, C. Péan, J. Romero (eds.)]. *In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 131-133, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.003.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 150

Anexo II

AFOLU	Agricultura, Floresta e Outros usos da terra
AR5	Quinto Relatório de Avaliação
AR6	Sexto Relatório de Avaliação
BECCS	Bioenergia com Captura e Armazenamento de Dióxido de Carbono
CCS	Captura e Armazenamento de Carbono
CCU	Captura e Utilização de Carbono
CDR	Remoção de Dióxido de Carbono
CH_4	Metano
CID	Agentes climáticos causadores de impacto
CMIP5	Quinta Fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados
CMIP6	Sexta Fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados
CO_2	Dióxido de Carbono
CO_2-e	Dióxido de Carbono Equivalente
CRD	Desenvolvimento Resiliente ao Clima
CO_2-FFI	CO_2 dos combustíveis fósseis e da indústria
CO_2-LULUCF	CO_2 do uso da terra, mudança de uso da terra e silvicultura
CSB	Caixa de Seção Transversal
DACCS	Captura e armazenamento de carbono diretamente do ar
DRM	Gestão de Risco de Desastres
EbA	Adaptação baseada em Ecossistema
ECS	Sensibilidade climática de equilíbrio
ES	Sumário Executivo
EV	Veículo Elétrico
EWS	Sistema de Alerta Precoce
FaIR	Modelo climático simples de resposta ao impulso de amplitude finita
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
FFI	Combustão de combustíveis fósseis e processos industriais
F-gases	Gases fluorados
GEE	Gás de Efeito Estufa
Gt	Gigatoneladas
GW	Gigawatt
GWL	Nível de Aquecimento Global
GWP100	Potencial de Aquecimento Global com um horizonte temporal de 100 anos*
HFCs	Hidrofluorcarbonetos
IEA	Agência Internacional de Energia
IEA-STEPS	Agência Internacional de Energia - Cenário de Políticas Declaradas
IMP	Caminho Ilustrativo de Mitigação
IMP-LD	Caminho Ilustrativo de Mitigação - Baixa demanda
IMP-NEG	Caminho Ilustrativo de Mitigação - Implantação de emissões negativas
IMP-SP	Caminho Ilustrativo de Mitigação - Mudança de caminhos de desenvolvimento
IMP-REN	Caminho Ilustrativo de Mitigação - Grande dependência de energias renováveis
IP-ModAct	Caminho Ilustrativo de Ação Moderada
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
kWh	Quilowatt-hora
LCOE	Custo nivelado de energia
LDC	Países Menos Desenvolvidos
Li-on	Íon-lítio
LK	Conhecimento Local
LULUCF	Uso da terra, mudança de uso da terra e silvicultura
MAGICC	Modelo para Avaliação de Mudanças Climáticas Induzidas por Gases de Efeito Estufa
MWh	Megawatt-hora
N_2O	Óxido Nitroso
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
NF_3	Trifluoreto de Nitrogênio
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
O_3	Ozônio
PFCs	Perfluorocarbonos
ppb	partes por bilhão
PPP	Paridade de poder de compra

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 151

PIB	Produto Interno Bruto
ppm	partes por milhão
PV	Fotovoltaica
RCB	Orçamento de Carbono Remanescente
RCPs	Caminhos de Concentração Representativos (por exemplo RCP2.6, caminho para o qual a forçante radiativa até 2100 está limitado a 2.6 Wm^{-2})
RFCs	Motivos de Preocupação
SDPs	Mudança de caminhos de desenvolvimento
SF_6	Hexafluoreto de Enxofre
SIDS	Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento
SLCF	Forçantes climáticos de vida curta
SPM	Resumo para Formuladores de Políticas
SR1.5	Relatório Especial sobre o Aquecimento Global de 1.5°C
SRCCL	Relatório Especial sobre Mudança do Clima e Terra
SRM	Modificação da Radiação Solar
SROCC	Relatório Especial sobre o Oceano e a Criosfera em um Clima em Mudança
SSP	Caminhos Socioeconômicos Compartilhados
SYR	Relatório Síntese
tCO_2-eq	Toneladas de Dióxido de Carbono Equivalente
tCO_2-FFI	Toneladas de Dióxido de Carbono dos combustíveis fósseis e da indústria
TS	Sumário Técnico
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
USD	Dolar americano
WG	Grupo de Trabalho
WGI	IPCC Grupo de Trabalho I
WGII	IPCC Grupo de Trabalho II
WGIII	IPCC Grupo de Trabalho III
WHO	Organização Mundial da Saúde
WIM	Mecanismo Internacional de Varsóvia sobre Perdas e Danos
Wm^{-2}	Watts por metro quadrado

*Para uma definição completa, consulte também o Anexo I: Glossário.

Definições de termos adicionais estão disponíveis no Glossário Online do IPCC: https://apps.ipcc.ch/glossary/

Anexo III
Contribuintes

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 154

Integrantes principais da equipe de redação

LEE, Hoesung
IPCC Chair
Korea University
Republic of Korea

CALVIN, Katherine
The National Aeronautics and Space Administration
USA

DASGUPTA, Dipak
The Energy and Resources Institute, India (TERI)
India / USA

KRINNER, Gerhard
The French National Centre for Scientific Research
France / Germany

MUKHERJI, Aditi
International Water Management Institute
India

THORNE, Peter
Maynooth University
Ireland / United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

TRISOS, Christopher
University of Cape Town
South Africa

ROMERO, José
IPCC SYR TSU
Switzerland

ALDUNCE, Paulina
University of Chile
Chile

BARRETT, Ko
IPCC Vice-Chair
National Oceanographic and Atmospheric Administration
USA

BLANCO, Gabriel
National University of the Center of the Province of Buenos Aires
Argentina

CHEUNG, William W. L.
The University of British Columbia
Canada

CONNORS, Sarah L.
WGI Technical Support Unit
France / United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

DENTON, Fatima
United Nations Economic Commission for Africa
The Gambia

DIONGUE-NIANG, Aïda
National Agency of Civil Aviation and Meteorology
Senegal

DODMAN, David
The Institute for Housing and Urban Development Studies
Jamaica / United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland) / Netherlands

GARSCHAGEN, Matthias
Ludwig Maximilian University of Munich
Germany

GEDEN, Oliver
German Institute for International and Security Affairs
Germany

HAYWARD, Bronwyn
University of Canterbury
New Zealand

JONES, Christopher
Met Office
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

JOTZO, Frank
The Australian National University
Australia

KRUG, Thelma
IPCC Vice-Chair
INPE, retired
Brazil

LASCO, Rodel
Consultative Group for International Agricultural Research
Philippines

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 155

LEE, June-Yi
Pusan National University
Republic of Korea

MASSON-DELMOTTE, Valérie
IPCC WGI Co-Chair
Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement
France

MEINSHAUSEN, Malte
University of Melbourne
Australia / Germany

MINTENBECK, Katja
IPCC WGII TSU / Alfred Wegener Institute
Germany

MOKSSIT, Abdalah
IPCC Secretariat
Morocco / WMO

OTTO, Friederike E. L.
Imperial College London
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland) / Germany

PATHAK, Minal
IPCC WGIII Technical Support Unit
Ahmedabad University
India

PIRANI, Anna
IPCC WGI Technical Support Unit
Italy

POLOCZANSKA, Elvira
IPCC WGII Technical Support Unit
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland) / Australia Germany

PÖRTNER, Hans-Otto
IPCC WGII Co-Chair
Alfred Wegener Institute
Germany

REVI, Aromar
Indian Institute for Human Settlements
India

ROBERTS, Debra C.
IPCC WGII Co-Chair
eThekwini Municipality
South Africa

ROY, Joyashree
Asian Institute of Technology
India / Thailand

RUANE, Alex C.
The National Aeronautics and Space Administration
USA

SHUKLA, Priyadarshi R.
IPCC WGIII Co-Chair
Ahmedabad University
India

SKEA, Jim
IPCC WGIII Co-Chair
Imperial College London
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

SLADE, Raphael
WG III Technical Support Unit
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

SLANGEN, Aimée
Royal Netherlands Institute for Sea Research
The Netherlands

SOKONA, Youba
IPCC Vice-Chair
African Development Bank
Mali

SÖRENSSON, Anna A.
Universidad de Buenos Aires
Argentina

TIGNOR, Melinda
IPCC WGII Technical Support Unit
USA / Germany

VAN UUREN, Detlef
Netherlands Environmental Assessment Agency
The Netherlands

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 156

WEI, Yi-Ming
Beijing Institute of Technology
China

WINKLER, Harald
University of Cape Town
South Africa

ZHAI, Panmao
IPCC WGI Co-Chair
Chinese Academy of Meteorological Sciences
China

ZOMMERS, Zinta
United Nations Office for Disaster Risk Reduction
Latvia

Membros Estendidos da Equipe de Redação

HOURCADE, Jean-Charles
International Center for Development and Environment
France

JOHNSON, Francis X.
Stockholm Environment Institute
Thailand / Sweden

PACHAURI, Shonali
International Institute for Applied Systems Analysis
Austria / India

SIMPSON, Nicholas P.
University of Cape Town
South Africa / Zimbabwe

SINGH, Chandni
Indian Institute for Human Settlements
India

THOMAS, Adelle
University of The Bahamas
Bahamas

TOTIN, Edmond
Université Nationale d'Agriculture
Benin

Editores de Revisão

ARIAS, Paola
Escuela Ambiental, Universidad de Antioquia
Colombia

BUSTAMANTE, Mercedes
University of Brasília
Brazil

ELGIZOULI, Ismail A.
Sudan

FLATO, Gregory
IPCC WGI Vice-Chair
Environment and Climate Change Canada
Canada

HOWDEN, Mark
IPCC WGII Vice-Chair
The Australian National University
Australia

MÉNDEZ, Carlos
IPCC WGII Vice-Chair
Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas
Venezuela

PEREIRA, Joy Jacqueline
IPCC WGII Vice-Chair
Universiti Kebangsaan Malaysia
Malaysia

PICHS-MADRUGA, Ramón
IPCC WGIII Vice-Chair
Centre for World Economy Studies
Cuba

ROSE, Steven K.
Electric Power Research Institute
USA

Saheb, Yamina
OpenExp
Algeria / France

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 157

SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, Roberto A.
IPCC WGII Vice-Chair
The College of the Northern Border
Mexico

ÜRGE-VORSATZ, Diana
IPCC WGIII Vice-Chair
Central European University
Hungary

XIAO, Cunde
Beijing Normal University
China

YASSAA, Noureddine
IPCC WGI Vice-Chair
Centre de Développement des Energies Renouvelables
Algeria

Autores Contribuintes

ALEGRÍA, Andrés
IPCC WGII TSU
Alfred Wegener Institute
Germany / Honduras

ARMOUR, Kyle
University of Washington
USA

BEDNAR-FRIEDL, Birgit
Universität Graz
Austria

BLOK, Kornelis
Delft University of Technology
The Netherlands

CISSÉ, Guéladio
Swiss Tropical and Public Health Institute and University of Basel
Mauritania / Switzerland / France

DENTENER, Frank
European commission
EU

ERIKSEN, Siri
Norwegian University of Life Sciences
Norway

FISCHER, Erich
ETH Zurich
Switzerland

GARNER, Gregory
Rutgers University
USA

GUIVARCH, Céline
Centre International de Recherche sur l'Environnement et le développement
France

HAASNOOT, Marjolijn
Deltares
The Netherlands

HANSEN, Gerrit
German Institute for International and Security Affairs
Germany

HAUSER, Matthias
ETH Zurich
Switzerland

HAWKINS, Ed
University of Reading
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

HERMANS, Tim
Royal Netherlands Institute for Sea Research
The Netherlands

KOPP, Robert
Rutgers University
USA

LEPRINCE-RINGUET, Noëmie
France

LEWIS, Jared
University of Melbourne and Climate Resource
Australia / New Zealand

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 158

LEY, Debora
Latinoamérica Renovable, UN ECLAC
Mexico / Guatemala

LUDDEN, Chloé
WG III Technical Support Unit
Germany / France

NIAMIR, Leila
International Institute for Applied Systems Analysis
Iran / The Netherlands / Austria

NICHOLLS, Zebedee
University of Melbourne
Australia

SOME, Shreya
IPCC WGIII Technical Support Unit
Asian Institute of Technology
India / Thailand

SZOPA, Sophie
Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
France

TREWIN, Blair
Australian Bureau of Meteorology
Australia

VAN DER WIJST, Kaj-Ivar
Netherlands Environmental Assessment Agency
The Netherlands

WINTER, Gundula
Deltares
The Netherlands / Germany

WITTING, Maximilian
Ludwig Maximilian University of Munich
Germany

Comitê Diretivo Científico

ABDULLA, Amjad
IPCC WGIII Vice-Chair
IRENA
Maldives

ALDRIAN, Edvin
IPCC WGI Co-Chair
Agency for Assessment and Application of Technology
Indonesia

CALVO, Eduardo
IPCC TFI Co-Chair
National University of San Marcos
Peru

CARRARO, Carlo
IPCC WGIII Vice-Chair
Ca' Foscari University of Venice
Italy

DRIOUECH, Fatima
IPCC WGI Vice-Chair
University Mohammed VI Polytechnic
Morocco

FISCHLIN, Andreas
IPCC WGII Vice-Chair
ETH Zurich
Switzerland

FUGLESTVEDT, Jan
IPCC WGI Vice-Chair
Center for International Climate Research (CICERO)
Norway

DADI, Diriba Korecha
IPCC WGIII Vice-Chair
Ethiopian Meteorological Institute
Ethiopia

MAHMOUD, Nagmeldin G.E.
IPCC WGIII Vice-Chair
Higher Council for Environment and Natural Resources
Sudan

REISINGER, Andy
IPCC WGIII Co-Chair
He Pou A Rangi Climate Change Commission
New Zealand

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 159

SEMENOV, Sergey
IPCC WGII Co-Chair
Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology
Russian Federation

TANABE, Kiyoto
IPCC TFI Co-Chair
Institute for Global Environmental Strategies
Japan

TARIQ, Muhammad Irfan
IPCC WGI Co-Chair
Ministry of Climate Change
Pakistan

VERA, Carolina
IPCC WGI Co-Chair
Universidad de Buenos Aires (CONICET)
Argentina

YANDA, Pius
IPCC WGII Co-Chair
University of Dar es Salaam
United Republic of Tanzania

YASSAA, Noureddine
IPCC WGI Co-Chair
Centre de Développement des Energies Renouvelables
Algeria

ZATARI, Taha M.
IPCC WGII Co-Chair
Ministry of Energy, Industry and Mineral Resources
Saudi Arabia

Anexo IV
Revisores Especialistas AR6 SYR

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 162

ABDELFATTAH, Eman
Cairo University
Egypt

ABULEIF, Khalid Mohamed
Ministry of Petroleum and Mineral Resources
Saudi Arabia

ACHAMPONG, Leia
European Network on Debt and Development (Eurodad)
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

AGRAWAL, Mahak
Center on Global Energy Policy
United States of America

AKAMANI, Kofi
Southern Illinois University Carbondale
United States of America

ÅKESSON, Ulrika
Sida
Sweden

ALBIHN, Ann
Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala
Sweden

ALCAMO, Joseph
University of Sussex
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

ALSARMI, Said
Oman Civil Aviation Authority
Oman

AMBRÓSIO, Luis Alberto
Instituto de Zootecnia
Brazil

AMONI, Alves Melina
WayCarbon Soluções Ambientais e Projetos de Carbono Ltda
Brazil

ANDRIANASOLO, Rivoniony
Ministère de l'Environnement et du Développement Durable
Madagascar

ANORUO, Chukwuma
University of Nigeria
Nigeria

ANWAR RATEB, Samy Ashraf
Egyptian Meteorological Authority
Egypt

APPADOO, Chandani
University of Mauritius
Mauritius

ARAMENDIA, Emmanuel
University of Leeds
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

ASADNABIZADEH, Majid
UMCS
Poland

ÁVILA ROMERO, Agustín
SEMARNAT
Mexico

BADRUZZAMAN, Ahmed
University of California, Berkeley, CA
United States of America

BALA, Govindasamy
Indian Institute of Science
India

BANDYOPADHYAY, Jayanta
Observer Research Foundation
India

BANERJEE, Manjushree
The Energy and Resources Institute
India

BARAL, Prashant
ICIMOD
Nepal

BAXTER, Tim
Climate Council of Australia
Australia

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 163

BELAID, Fateh
King Abdullah Petroleum Studies and Research Center
Saudi Arabia

BELEM, Andre
Universidade Federal Fluminense
Brazil

BENDZ, David
Swedish Geotechnical Institute
Sweden

BENKO, Bernadett
Ministry of Innovation and Technology
Hungary

BENNETT, Helen
Department of Industry, Science, Energy and Resources
Australia

BENTATA, Salah Eddine
Algerian Space Agency
Algeria

BERK, Marcel
Ministry of Economic Affairs and Climate Policy
Netherlands

BERNDT, Alexandre
EMBRAPA
Brazil

BEST, Frank
HTWG Konstanz
Germany

BHATT, Jayavardhan Ramanlal
Ministry of Environment, Forests and Climate Change
India

BHATTI, Manpreet
Guru Nanak Dev University
India

BIGANO, Andrea
Euro-Mediterranean Centre on Climate Change (CMCC)
Italy

BOLLINGER, Dominique
HEIG-VD / HES-SO
Switzerland

BONDUELLE, Antoine
E&E Consultant sarl
France

BRAGA, Diego
Universidade Federal do ABC and WayCarbon Environmental Solutions
Brazil

BRAUCH, Hans Guenter
Hans Günter Brauch Foundation on Peace and Ecology in the Anthropocene
Germany

BRAVO, Giangiacomo
Linnaeus University
Sweden

BROCKWAY, Paul
University of Leeds
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

BRUN, Eric
Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire
France

BRUNNER, Cyril
Institute of Atmospheric and Climate Science, ETH Zürich
Switzerland

BUDINIS, Sara
International Energy Agency, Imperial College London
France

BUTO, Olga
Wood Plc
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

CARDOSO, Manoel
Brazilian Institute for Space Research (INPE)
Brazil

CASERINI, Stefano
Politecnico di Milano
Italy

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 164

CASTELLANOS, Sebastián
World Resources Institute
United States of America

CATALANO, Franco
ENEA
Italy

CAUBEL, David
Ministry of Ecological Transition
France

CHAKRABARTY, Subrata
World Resources Institute
India

CHAN SIEW HWA, Nanyang
Technological University
Singapore

CHANDRASEKHARAN, Nair Kesavachandran
CSIR-National Institute for Interdisciplinary Science and Technology
India

CHANG, Hoon
Korea Environment Institute
Republic of Korea

CHANG'A Ladislaus
Tanzania Meteorological Authority (TMA)
United Republic of Tanzania

CHERYL, Jeffers
Ministry of Agriculture, Marine Resources, Cooperatives, Environment and Human Settlements
Saint Kitts and Nevis

CHESTNOY, Sergey
UC RUSAL
Russian Federation

CHOI, Young-jin
Phineo gAG
Germany

CHOMTORANIN, Jainta
Ministry of Agriculture and Cooperatives
Thailand

CHORLEY, Hanna
Ministry for the Environment
New Zealand

CHRISTENSEN, Tina
Danish Meteorological Institute
Denmark

CHRISTOPHERSEN, Øyvind
Norwegian Environment Agency
Norway

CIARLO, James
International Centre for Theoretical Physics
Italy

CINIRO, Costa Jr
CGIAR
Brazil

COOK, Jolene
Department for Business, Energy & Industrial Strategy
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

COOK, Lindsey
FWCC
Germany

COOPER, Jasmin
Imperial College London
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

COPPOLA, Erika
ICTP
Italy

CORNEJO RODRÍGUEZ, Maria del Pilar
Escuela Superior Politécnica del Litoral
Ecuador

CORNELIUS, Stephen
WWF
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

CORTES, Pedro Luiz
University of Sao Paulo
Brazil

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 165

COSTA, Inês
Ministry of Environment and Climate Action
Portugal

COVACIU, Andra
Centre of Natural Hazards and Disaster Science
Sweden

COX, Janice
World Federation for Animals
South Africa

CURRIE-ALDER, Bruce
International Development Research Centre
Canada

CZERNICHOWSKI-LAURIOL, Isabelle
BRGM
France

D'IORIO, Marc
Environment and Climate Change Canada
Canada

DAS, Anannya
Centre for Science and Environment
India

DAS, Pallavi
Council on Energy, Environment and Water (CEEW)
India

DE ARO GALERA, Leonardo
Universität Hamburg
Germany

DE MACEDO PONTUAL COELHO, Camila
Rio de Janeiro City Hall
Brazil

DE OLIVEIRA E AGUIAR, Alexandre
Invento Consultoria
Brazil

DEDEOGLU, Cagdas
Yorkville University
Canada

DEKKER, Sabrina
Dekker Dublin City Council
Ireland

DENTON, Peter
Royal Military College of Canada, University of Winnipeg, University of Manitoba
Canada

DEVKOTA, Thakur Prasad
ITC
Nepal

DICKSON, Neil
ICAO
Canada

DIXON, Tim
IEAGHG
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

DODOO, Ambrose
Linnaeus University
Sweden

DOMÍNGUEZ Sánchez, Ruth
Creara
Spain

DRAGICEVIC, Arnaud
INRAE
France

DREYFUS, Gabrielle
Institute for Governance & Sustainable Development
United States of America

DUMBLE, Paul
Retired Land, Resource and Waste Specialist
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

DUNHAM, Maciel André
Ministry of Foreign Affairs
Brazil

DZIELIŃSKI, Michał
Stockholm University
Sweden

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 166

ELLIS, Anna
The Open University
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

EL-NAZER, Mostafa
National Research Centre
Egypt

FARROW, Aidan
Greenpeace Research Laboratories
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

FERNANDES, Alexandre
Belgian Science Policy Office
Belgium

FINLAYSON, Marjahn
Cape Eleuthera Institute
Bahamas

FINNVEDEN, Göran
KTH
Sweden

FISCHER, David
International Energy Agency
France

FLEMING, Sea
University of British Columbia, Oregon State University, and US Department of Agriculture
United States of America

FORAMITTI, Joël
Universitat Autònoma de Barcelona
Spain

FRA PALEO, Urbano
University of Extremadura
Spain

FRACASSI, Umberto
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Italy

FRÖLICHER, Thomas
University of Bern
Switzerland

FUGLESTVEDT, Jan
IPCC WGI Vice-Chair
CICERO
Norway

GARCÍA MORA, Magdalena
ACCIONA ENERGíA
Spain

GARCÍA PORTILLA, Jason
University of St. Gallen
Switzerland

GARCÍA SOTO, Carlos
Spanish Institute of Oceanography
Spain

GEDEN, Oliver
German Institute for International and Security Affairs
Germany

GEHL, Georges
Ministère du Développement Durable et des Infrastructures
Luxembourg

GIL, Ramón Vladimir
Catholic University of Peru
Peru

GONZÁLEZ, Fernando Antonio Ignacio
IIESS
Argentina

GRANSHAW, Frank D.
Portland State University
United States of America

GREEN, Fergus
University College London
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

GREENWALT, Julie
Go Green for Climate
Netherlands

GRIFFIN, Emer
Department of Communications, Climate Action and Environment
Ireland

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 167

GRIFFITHS, Andy
Diageo
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

GUENTHER, Genevieve
The New School
United States of America

GUIMARA, Kristel
North Country Community College
United States of America

GUIOT, Joël
CEREGE / CNRS
France

HAIRABEDIAN, Jordan
EcoAct
France

HAMAGUCHI, Ryo
UNFCCC
Germany

HAMILTON, Stephen
Michigan State University and Cary Institute of Ecosystem Studies
United States of America

HAN, In-Seong
National Institute of Fisheries Science
Republic of Korea

HANNULA, Ilkka
IEA
France

HARJO, Rebecca
NOAA/National Weather Service
United States of America

HARNISCH, Jochen
KFW Development Bank
Germany

HASANEIN, Amin
Islamic Relief Deutschland
Germany

HATZAKI, Maria
National and Kapodistrian University of Athens
Greece

HAUSKER, Karl
World Resources Institute
United States of America

HEGDE, Gajanana
UNFCCC
Germany

HENRIIKKA, Säkö
Forward Advisory
Switzerland

HIGGINS, Lindsey
Pale Blue Dot
Sweden

HOFFERBERTH, Elena
University of Leeds
Switzerland

IGNASZEWSKI, Emma
Good Food Institute
United States of America

IMHOF, Lelia
IRNASUS (CONICET-Universidad Católica de Córdoba)
Argentina

JÁCOME POLIT, David
Universidad de las Américas
Ecuador

JADRIJEVIC GIRARDI, Maritza
Ministry of Environment
Chile

JAMDADE, Akshay Anil
Central European University
Austria

JAOUDE, Daniel
Studies Center for Public Policy in Human Rights at Federal University of Rio de Janeiro
Brazil

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 168

JATIB, María Inés
Institute of Science and Technology of the National University of Tres de Febrero (ICyTec-UNTREF)
Argentina

JIE, Jiang
Institute of Atmospheric Physics
China

JÖCKEL, Dennis Michael
Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS
Germany

JOHANNESSEN, Ase
Global Center on Adaptation and Lund University
Sweden

JOHNSON, Francis Xavier
Stockholm Environment Institute
Thailand

JONES, Richard
Met Office Hadley Centre
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

JRAD, Amel
Consultant
Tunisia

JUNGMAN, Laura
Consultant
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

KÄÄB, Andreas
University of Oslo
Norway

KADITI, Eleni
Organization of the Petroleum Exporting Countries
Austria

KAINUMA, Mikiko
Institute for Global Environmental Strategies
Japan

KANAYA, Yugo
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
Japan

KASKE-KUCK, Clea
WBCSD
Switzerland

KAUROLA, Jussi
Finnish Meteorological Institute
Finland

KEKANA, Maesela
Department of Environmental Affairs
South Africa

KELLNER, Julie
ICES and WHOI
Denmark

KEMPER, Jasmin
IEAGHG United
Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

KHANNA, Sanjay
McMaster University
Canada

KIENDLER-SCHARR, Astrid
Forschungszentrum Jülich and University Cologne
Austria

KILKIS, Siir
The Scientific and Technological Research Council of Turkey
Turkey

KIM, Hyungjun
Korea Advanced Institute of Science and Technology
Republic of Korea

KIM, Rae Hyun
Central Government
Republic of Korea

KIMANI, Margaret
Kenya Meteorological services
Kenya

KING-CLANCY, Erin
King County Prosecuting Attorney's Office
United States of America

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 169

KOFANOV, Oleksii
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Ukraine

KOFANOVA, Olena
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Ukraine

KONDO, Hiroaki
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
Japan

KOPP, Robert
Rutgers University
United States of America

KOREN, Gerbrand
Utrecht University
Netherlands

KOSONEN, Kaisa
Greenpeace
Finland

KRUGLIKOVA, Nina
University of Oxford
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

KUMAR, Anupam
National Environment Agency
Singapore

KUNNAS, Jan
University of Jyväskylä
Finland

KUSCH-BRANDT, Sigrid
University of Southampton and ScEnSers Independent Expertise
Germany

KVERNDOKK, Snorre
Frisc
Norway

LA BRANCHE, Stéphane
International Panel On behavioural Chante
France

LABINTAN, Adeniyi
African Development Bank (AfDB)
South Africa

LABRIET, Maryse
Eneris Consultants
Spain

LAMBERT, Laurent
Doha Institute for Graduate Studies (Qatar) and Sciences Po Paris (France)
France / Qatar

LE COZANNET, Gonéri
BRGM
France

LEAVY, Sebastián
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria / Universidad Nacional de Rosario
Argentina

LECLERC, Christine
Simon Fraser University
Canada

LEE, Arthur
Chevron Services Company
United States of America

LEE, Joyce
Global Wind Energy Council
Germany

LEHOCZKY, Annamaria
Fauna and Flora International
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

LEITER, Timo
London School of Economics and Political Science
Germany

LENNON, Breffní
University College Cork
Ireland

LIM, Jinsun
International Energy Agency
France

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 170

LLASAT, Maria Carmen
Universidad de Barcelona
Spain

LOBB, David
University of Manitoba
Canada

LÓPEZ DÍEZ, Abel
University of La Laguna
Spain

LUENING, Sebastian
Institute for Hydrography, Geoecology and Climate Sciences
Germany

LYNN, Jonathan
IPCC
Switzerland

MABORA, Thupana
University of South Africa and Rhodes University
South Africa

MARTINERIE, Patricia
Institut des Géosciences de l'Environnement, CNRS
France

MARTIN-NAGLE, Renée
A Ripple Effect
United States of America

MASSON-DELMOTTE, Valerie
IPCC WGI Co-Chair
IPSL/LSCE, Université Paris Saclay
France

MATHESON, Shirley
WWF EPO
Belgium

MATHISON, Camilla
UK Met Office
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

MATKAR, Ketna
Cipher Environmental Solutions LLP
India

MBATU, Richard
University of South Florida
United States of America

MCCABE, David
Clean Air Task Force
United States of America

MCKINLEY, Ian
McKinley Consulting
Switzerland

MERABET, Hamza
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Algeria

LUBANGO, Louis Mitondo
United Nations
Ethiopia

MKUHLANI, Siyabusa
International Institute for Tropical Agriculture
Kenya

MOKIEVSKY, Vadim
IO RAS
Russian Federation

MOLINA, Luisa
Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment
United States of America

MORENO, Ana Rosa
National Autonomous University of Mexico
Mexico

MUDELSEE, Manfred
Climate Risk Analysis - Manfred Mudelsee e.K.
Germany

MUDHOO, Ackmez
University of Mauritius
Mauritius

MUKHERJI, Aditi
IWMI
India

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 171

MULCHAN, Neil
Retired from University System of Florida
United States of America

MÜLLER, Gerrit
Utrecht University
Netherlands

NAIR, Sukumaran
Center for Green Technology & Management
India

NASER, Humood
University of Bahrain
Bahrain

NDAO, Séga
New Zealand Agricultural Greenhouse Gas Research Centre
Senegal

NDIONE, Jacques André
ANSTS
Senegal

NEGREIROS, Priscilla
Climate Policy Initiative
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

NELSON, Gillian
We Mean Business Coalition
France

NEMITZ , Dirk
UNFCCC
Germany

NG, Chris
Greenpeace
Canada

NICOLINI, Cecilia
Ministry of Environment and Sustainable Development
Argentina

NISHIOKA, Shuzo
Institute for Global Environmental Strategies
Japan

NKUBA, Michael
University of Botswana
Botswana

NOHARA, Daisuke
Kajima Technical Research Institute
Japan

NOONE, Clare
Maynooth University
Ireland

NORDMARK, Sara
The Swedish Civil Contingencies Agency
Sweden

NTAHOMPAGAZE, Pascal
Expert
Belgium

NYINGURO, Patricia
Kenya Meteorological Service
Kenya

NZOTUNGICIMPAYE, Claude-Michel
Concordia University
Canada

OBBARD, Jeff
Cranfield University (UK) and Centre for Climate Research (Singapore)
Singapore

O'BRIEN, Jim
Irish Climate Science Forum
Ireland

O'CALLAGHAN, Donal
Retired from Teagasc Agriculture Development Authority
Ireland

OCKO, Ilissa
Environmental Defense Fund
United States of America

OH, Yae Won
Korea Meteorological Administration
Republic of Korea

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 172

O'HARA, Ryan
Harvey Mudd College
United States of America

OHNEISER, Christian
University of Otago
New Zealand

OKPALA, Denise
ECOWAS Commission
Nigeria

OMAR, Samira
Kuwait Institute for Scientific Research
Kuwait

ORLOV, Alexander
Ukraine

ORTIZ, Mark
The University of North Carolina at Chapel Hill
United States of America

OSCHLIES, Andreas
GEOMAR
Germany

OTAKA, Junichiro
Ministry of Foreign Affairs
Japan

PACAÑOT, Vince Davidson
University of the Philippines Diliman
Philippines

PALMER, Tamzin
Met Office
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

PARRIQUE, Timothée
Université Clermont Auvergne
France

PATTNAYAK, Kanhu Charan
Ministry of Sustainability and Environment
Singapore

PEIMANI, Hooman
International Institute for Asian Studies and Leiden University (The Netherlands)
Canada

PELEJERO, Carles
ICREA and Institut de Ciències del Mar, CSIC
Spain

PERUGINI, Lucia
Euro-Mediterranean Center on Climate Change
Italy

PETERS, Aribert
Bund der Energieverbraucher e.V.
Germany

PETERSON, Bela
coneva GmbH
Germany

PETTERSSON, Eva
Royal Swedish Academy of Agriculture and Forestry
Sweden

PINO MAESO, Alfonso
Ministerio de la Transición Ecológica
Spain

PLAISANCE, Guillaume
Bordeaux University
France

PLANTON, Serge
Association Météo et Climat
France

PLENCOVICH, María Cristina
Universidad de Buenos Aires
Argentina

PLESNIK, Jan
Nature Conservation Agency of the Czech Republic
Czech Republic

POLONSKY, Alexander
Institute of Natural Technical Systems
Russian Federation

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 173

POPE, James
Met Office
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

PÖRTNER, Hans-Otto
IPCC WGII Co-Chair
Alfred-Wegener-Institute for Polar and Marine Research
Germany

PRENKERT, Frans
Örebro University
Sweden

PRICE, Joseph
UNEP
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

QUENTA, Estefania
Universidad Mayor de San Andrés
Bolivia

RADUNSKY, Klaus
Austrian Standard International
Austria

RAHAL, Farid
University of Sciences and Technology of Oran - Mohamed Boudiaf
Algeria

RAHMAN, Syed Masiur
King Fahd University of Petroleum & Minerals
Saudi Arabia

RAHMAN, Mohammad Mahbubur
Lancaster University
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

RAYNAUD, Dominique
CNRS
France

REALE, Marco
National Institute of Oceanography and Applied Geophysics
Italy

RECALDE, Marina
FUNDACION BARILOCHE / CONICET
Argentina

REISINGER, Andy
IPCC WGIII Vice-Chair
Climate Change Commission
New Zealand

RÉMY, Eric
Université Toulouse III Paul Sabatier
France

REYNOLDS, Jesse
Consultant
Netherlands

RIZZO, Lucca
Mattos Filho
Brazil

RÓBERT, Blaško
Slovak Environment Agency
Slovakia

ROBOCK, Alan
Rutgers University
United States of America

RODRIGUES, Mónica A.
University of Coimbra
Portugal

ROELKE, Luisa
Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety
Germany

ROGERS, Cassandra
Australian Bureau of Meteorology
Australia

ROMERI, Mario Valentino
Consultant
Italy

ROMERO, Javier
University of Salamanca
Spain

ROMERO, Mauricio
National Unit for Disaster Risk Management
Colombia

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 174

RUIZ-LUNA, Arturo
Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. - Unidad Mazatlán
Mexico

RUMMUKAINEN, Markku
Swedish Meteorological and Hydrological Institute
Sweden

SAAD-HUSSEIN, Amal
Environment & Climate Change Research Institute, National Research Centre
Egypt

SALA, Hernan E.
Argentine Antarctic Institute - National Antarctic Directorate
Argentina

SALADIN, Claire
IUCN / WIDECAST
France

SALAS Y MELIA, David
Météo-France
France

SANGHA, Kamaljit K.
Charles Darwin University
Australia

SANTILLO, David
Greenpeace Research Laboratories (University of Exeter)
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

SCHACK, Michael
ENGIE, Consultant
France

SCHNEIDER, Linda
Heinrich Boell Foundation
Germany

SEMENOV, Sergey
IPCC WGII Vice-Chair
Institute of Global Climate and Ecology
Russian Federation

SENSOY, Serhat
Turkish State Meteorological Service
Turkey

SHAH, Parita
University of Nairobi
Kenya

SILVA, Vintura
UNFCCC
Grenada

SINGH, Bhawan
University of Montreal
Canada

SMITH, Sharon
Geological Survey of Canada, Natural Resources Canada
Canada

SMITH, Inga Jane
University of Otago
New Zealand

SOLMAN, Silvina Alicia
CIMA (CONICET/UBA)-DCAO (FCEN/UBA)
Argentina

SOOD, Rashmi
Concentrix
India

SPRINZ, Detlef
PIK
Germany

STARK, Wendelin
ETH Zurich,
Switzerland

STRIDBÆK, Ulrik
Ørsted A/S
Denmark

SUGIYAMA, Masahiro
University of Tokyo
Japan

SUN, Tianyi
Environmental Defense Fund
United States of America

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 175

SUTTON, Adrienne
NOAA
United States of America

SYDNOR, Marc
Apex Clean Energy
United States of America

SZOPA, Sophie
Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives
France

TADDEI, Renzo
Federal University of Sao Paulo
Brazil

TAIMAR, Ala
Estonian Meteorological & Hydrological Institute
Estonia

TAJBAKHSH, Mosalman Sahar
Islamic Republic of Iran Meteorological Organization
Iran

TALLEY, Trigg
U.S. Department of State
United States of America

TANCREDI, Elda
National University of Lujan
Argentina

TARTARI, Gianni
Water Research Institute - National Research Council of Italy
Italy

TAYLOR, Luke
Otago Innovation Ltd (University of Otago)
New Zealand

THOMPSON, Simon
Chartered Banker Institute
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

TIRADO, Reyes
Greenpeace International and University of Exeter
Spain

TREGUIER, Anne Marie
CNRS
France

TULKENS, Philippe
European Union
Belgium

TURTON, Hal
International Atomic Energy Agency
Austria

TUY, Héctor
Organismo Indígena Naleb'
Guatemala

TYRRELL, Tristan
Ireland

URGE-VORSATZ, Diana
IPCC WGIII Vice-Chair
Central European University
Hungary

VACCARO, James
Climate Safe Lending Network
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

VAN YPERSELE, Jean-Pascal
Université Catholique de Louvain
Belgium

VASS, Tiffany
IEA
France

VERCHOT, Louis
Alliance Bioversity Ciat
Colombia

VICENTE-VICENTE, Jose Luis
Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research
Germany

VILLAMIZAR, Alicia
Universidad Simón Bolívar
Venezuela

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 176

VOGEL, Jefim
University of Leeds
United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)

VON SCHUCKMANN, Karina
Mercator Ocean International
France

VORA, Nemi
Amazon Worldwide Sustainability and IIASA
United States of America

WALZ, Josefine
Federal Agency for Nature Conservation
Germany

WEI, Taoyuan
CICERO
Norway

WEIJIE, Zhang
Ministry of Environment and Natural Resources
Singapore

WESSELS, Josepha
Malmö University
Sweden

WITTENBRINK, Heinrich
FH Joanneum
Austria

WITTMANN, Veronika
Johannes Kepler University Linz
Austria

WONG, Li Wah
CEARCH
Germany

WONG, Poh Poh
University of Adelaide
Australia / Singapore

WYROWSKI, Lukasz
UNECE
Switzerland

YAHYA, Mohammed
IUCN
Kenya

YANG, Liang Emlyn
LMU Munich
Germany

YOMMEE, Suriyakit
Thammasat University
Thailand

YU, Jianjun
National Environment Agency
Singapore

YULIZAR, Yulizar
Universitas Pertamina
Indonesia

ZAELKE, Durwood
Institute for Governance & Sustainable Development
United States of America

ZAJAC, Joseph
Technical Reviewer
United States of America

ZANGARI DEL BALZO, Gianluigi
Sapienza University of Rome
Italy

ZDRULI, Pandi
CIHEAM
Italy

ZHUANG, Guotai
China Meteorological Administration
China

ZOMMERS, Zinta
Latvia

ZOPATTI, Alvaro
University of Buenos Aires
Argentina

Anexo V
Lista de Publicações do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 178

Relatórios de Avaliação

Sexto Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 2021: A Base das Ciências Físicas
Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Sexto Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 2022: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade
Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Sexto Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 2022: Mitigação da Mudança do Clima
Contribuição do Grupo de Trabalho III para o Sexto Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese
Um Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima

Quinto Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 2013: A Base das Ciências Físicas
Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 2014: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade
Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Quinto Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 2014: Mitigação da Mudança do Clima
Contribuição do Grupo de Trabalho III para o Quinto Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 2014: Relatório Síntese
Um Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima

Quarto Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 2007: A Base das Ciências Físicas
Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quarto Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 2007: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade
Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Quarto Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 2007: Mitigação da Mudança do Clima
Contribuição do Grupo de Trabalho III para o Quarto Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 2007: Relatório Síntese
Um Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima

Terceiro Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 2007: A Base Científica
Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Terceiro Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 2001: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade
Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Terceiro Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 2001: Mitigação
Contribuição do Grupo de Trabalho III para o Terceiro Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 2001: Relatório Síntese
Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Terceiro Relatório de Avaliação

Segundo Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 1995: A Ciência da Mudança do Clima
Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Segundo Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 1995: Análises Técnico-Científicas dos Impactos, Adaptações e Mitigação da Mudança do Clima
Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Segundo Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 1995: Dimensões Econômicas e Sociais da Mudança do Clima
Contribuição do Grupo de Trabalho III para o Segundo Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 1995: Síntese de Informações Técnico-Científicas Relevantes para a Interpretação do Artigo 2 da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
Um Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima

Relatórios Suplementares ao Primeiro Relatório de Avaliação

Mudança do Clima 1992: Relatório Suplementar da Avaliação Científica do IPCC
Relatório Suplementar do Grupo de Trabalho I sobre Avaliação Científica do IPCC

Mudança do Clima 1992: Relatório Suplementar da Avaliação de Impactos do IPCC
Relatório Suplementar do Grupo de Trabalho II sobre Avaliação de Impactos do IPCC

Mudança do Clima: As Avaliações do IPCC de 1990 e 1992
Visão Geral do Primeiro Relatório de Avaliação do IPCC e Sumários para Formuladores de Políticas e Suplemento do IPCC de 1992

Primeiro Relatório de Avaliação

Lista de Publicações do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima

Relatórios de Metodologia e Diretrizes Técnicas

Mudança do Clima: A Avaliação Científica
Relatório do Grupo de Trabalho I sobre Avaliação Científica do IPCC, 1990

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO6, Página 179

Mudança do Clima: A Avaliação de Impactos do IPCC
Relatório do Grupo de Trabalho II sobre Avaliação de Impactos do IPCC, 1990

Mudança do Clima: As Estratégias de Resposta do IPCC
Relatório do Grupo de Trabalho III sobre Estratégias de Resposta do IPCC, 1990

Relatórios Especiais

O Oceano e a Criosfera em um Clima em Mudança 2019

Mudança do Clima e Terra
Um Relatório Especial do IPCC sobre mudança do clima, desertificação, degradação da terra, gestão sustentável da terra, segurança alimentar e fluxos de gases de efeito estufa em ecossistemas terrestres 2019

Aquecimento Global de 1,5°C
Um relatório especial do IPCC sobre os impactos do aquecimento global de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais e os caminhos de emissões globais de gases de efeito estufa relacionados, no contexto do fortalecimento da resposta global à ameaça da mudança do clima, do desenvolvimento sustentável e dos esforços para a erradicação da pobreza. 2018

Gerenciando os Riscos de Eventos Extremos e Desastres para Promover a Adaptação à Mudança do Clima 2012

Fontes de Energias Renováveis e Mitigação da Mudança do Clima 2011

Captura e Armazenamento de Dióxido de Carbono 2005

Protegendo a Camada de Ozônio e o Sistema Climático Global: Problemas Relacionados a Hidrofluorocarbonetos e Perfluorocarbonetoss (relatório conjunto IPCC/TEAP) 2005

Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas 2000

Cenários de Emissões 2000

Problemas Metodológicos e Tecnológicos na Transferência de Tecnologia 2000

Aviação e a Atmosfera Global 1999

Os Impactos Regionais da Mudança do Clima: Uma Avaliação da Vulnerabilidade 1997

Mudança do Clima 1994: Forçamento Radiativo da Mudança do Clima e uma Avaliação dos Cenários de Emissões IS92 do IPCC 1994

Relatórios de Metodologia e Diretrizes Técnicas

Refinamento de 2019 das Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa 2019

Métodos Suplementares Revisados de 2013 e Diretrizes de Boas Práticas Decorrentes do Protocolo de Quioto (Suplemento KP) 2014

Suplemento de 2013 às Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa: Áreas Úmidas (Suplemento Áreas Úmidas) 2014

Diretrizes de 2006 do IPCC para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa (5 Volumes) 2006

Definições e Opções Metodológicas para o Inventário de Emissões da Degradação Direta de Florestas Induzida pelo Homem e Destruição do Revestimento Vegetal de Outros Tipos de Vegetação 2003

Guia de Boas Práticas para o Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Silvicultura 2003

Guia de Boas Práticas e Gestão de Incertezas em Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa 2000

Diretrizes Revisadas do IPCC de 1996 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa (3 Volumes) 1996

Diretrizes Técnicas do IPCC para Avaliação dos Impactos da Mudança do Clima e Adaptações, 1994

Diretrizes do IPCC para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa (3 Volumes) 1994

Diretrizes Preliminares para Avaliação dos Impactos da Mudança do Clima 1992

Artigos Técnicos

Mudança do Clima e Água
Artigo Técnico VI do IPCC, 2008

Mudança do Clima e Biodiversidade
Artigo Técnico V do IPCC, 2002

Implicações das Limitações de Emissões de CO2 Propostas
Artigo Técnico IV do IPCC, 1997

Anexo V

Estabilização de Gases de Efeito Estufa na Atmosfera: Implicações Físicas, Biológicas e Socioeconômicas
Artigo Técnico III do IPCC, 1997

Uma Introdução aos Modelos Climáticos Simples Utilizados no Segundo Relatório de Avaliação do IPCC
Artigo Técnico II do IPCC, 1997

Tecnologias, Políticas e Medidas de Mitigação da Mudança do Clima
Artigo Técnico I do IPCC, 1996

Para obter uma lista do Material de Apoio publicado pelo IPCC (relatórios de workshops e reuniões), consulte www.ipcc.ch ou entre em contato com o Secretariado do IPCC, c/o Organização Meteorológica Mundial, 7 bis Avenue de la Paix, Case Postale 2300, Ch-1211 Genebra 2, Suíça

O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) é o principal órgão internacional para a avaliação da mudança do clima. Foi criado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para fornecer uma avaliação internacional confiável dos aspectos científicos da mudança do clima com base nas mais recentes informações científicas, técnicas e socioeconômicas publicadas ao redor do globo. As avaliações periódicas do IPCC sobre as causas, os impactos e as possíveis estratégias de resposta à mudança do clima são os relatórios mais abrangentes e atualizados disponíveis sobre o assunto e constituem a referência padrão para todos os envolvidos com mudança do clima no meio acadêmico, no governo e no setor em todo o mundo. Este Relatório Síntese é o quarto elemento do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC, Mudança do Clima 2021/2023. Mais de 800 especialistas internacionais avaliaram a mudança do clima nesse Sexto Relatório de Avaliação. As três contribuições dos Grupos de Trabalho estão disponíveis na Cambridge University Press:

Mudança do Clima 2021: A Base das Ciências Físicas
Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Sexto Relatório de
Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima

ISBN - Conjunto de 2 volumes: 978-1-009-15788-9 Brochura
ISBN - Volume 1: 978-1-009-41954-3 Brochura
ISBN - Volume 2: 978-1-009-41958-1 Brochura
doi: 10.1017/9781009157896

Mudança do Clima 2022: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade
Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Sexto Relatório de
Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima

ISBN - Conjunto de 3 volumes: 978-1-009-32583-7 Brochura
ISBN - Volume 1: 978-1-009-15790-2 Brochura
ISBN - Volume 2: 978-1-009-15799-5 Brochura
ISBN - Volume 3: 978-1-009-34963-5 Brochura
doi: 10.1017/9781009374347

Mudança do Clima 2022: Mitigação da Mudança do Clima
Contribuição do Grupo de Trabalho III para o Sexto Relatório de
Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima

ISBN - Conjunto de dois volumes: ISBN 978-1-009-15793-3 Brochura
ISBN - Volume 1: ISBN 978-1-009-42390-8 Brochura
ISBN - Volume 2: ISBN 978-1-009-42391-5 Brochura
doi: 10.1017/9781009157926

Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese se baseia nas avaliações realizadas pelos três Grupos de Trabalho do IPCC, tendo sido escrito por uma Equipe de Redação Principal dedicada de autores. Ele fornece uma avaliação integrada da mudança do clima e aborda os seguintes tópicos:

- Situação Atual e Tendências
- Perspectivas de Clima e de Desenvolvimento no Longo Prazo
- Respostas no Curto Prazo para um Clima em Mudança

ISBN: 978-92-9169-164-7
doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647





CarbonMajors

2024 Data Update

January 2026

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 2

CarbonMajors

Table of Contents

Executive Summary 2

Introduction 4

This Year in Climate Accountability 6

Methodology 8

Findings 9

Conclusion 18

Appendix 1: 2024 Emissions 19

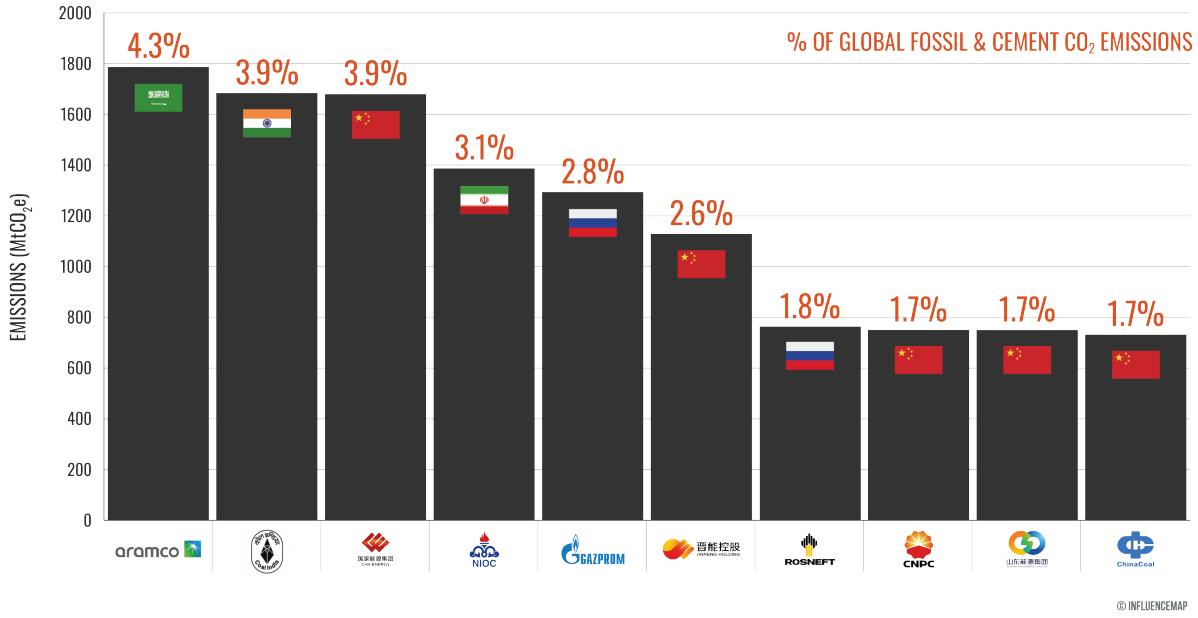
Appendix 2: Historical Emissions (1854–2024) 24

CarbonMajors

Executive Summary

- The Carbon Majors database traces 34.7 $GtCO_2e$ of greenhouse gas emissions in 2024 to 166 oil, gas, coal, and cement producers, a 0.8% increase from these entities' total emissions in 2023. Just 32 companies were linked to over half of global fossil fuel and cement CO_2 emissions in 2024. As shown in Figure 1, the top 10 companies by emissions, cumulatively responsible for 27.6% of global fossil CO_2 emissions in 2024, were all fully or majority state-owned companies.

Figure 1: Top 10 Companies by Emissions (2024)



- Carbon Majors is a database of historical production data for 178 of the world's largest oil, gas, coal, and cement producers, consisting of 166 active and 12 inactive entities. This data is used to quantify the direct production-linked operational emissions and emissions from the combustion of marketed products that can be attributed to these entities. The database is updated annually and is available at *carbonmajors.org*. This briefing presents the updated data for the 2024 reporting year.

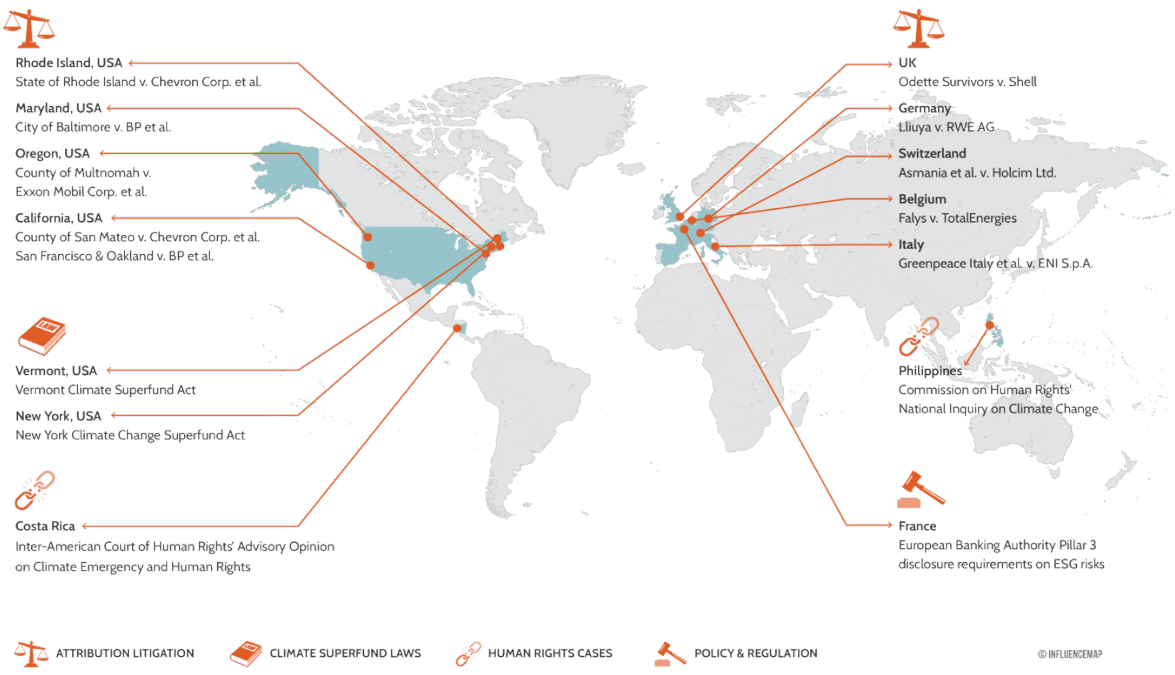
- State-owned companies dominated global fossil fuel emissions in 2024. The database shows that state-owned companies accounted for 54.0% of emissions, while 93 investor-owned companies accounted for 23.7%. This analysis also finds that most state-owned companies (54%) increased emissions year-over-year, whereas a majority of investor-owned companies (57%) reduced theirs.

- Emissions are increasingly concentrated among a smaller number of companies. In 2024, just 32 companies were responsible for over half of global fossil CO_2 emissions, down from 38 five years earlier. Two thirds of companies in the top half of the rankings increased their emissions from 2023 to 2024, compared to just 28% of entities in the bottom half, with growth among the largest entities

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 4

driven by both mergers and acquisitions and continued expansion of production.

Figure 2: Carbon Majors: Key Legal and Policy Use Cases



- In 2025, accountability mechanisms grounded in historical corporate emissions continued to gather pace, with the Carbon Majors database serving as a core evidentiary resource:
  - Up to $75 billion in potential climate damage payments is being sought by the US State of New York from fossil fuel producers in its *Climate Superfund Bill*, with the Carbon Majors database helping to quantify the link between companies' emissions and climate damages. Superfund legislation has also been passed in *Vermont*, and over a dozen additional states are advancing similar bills requiring major fossil fuel companies to pay for damages related to their emissions.
  - Carbon Majors featured prominently in the German tort law and climate litigation case Lliuya v. RWE, where a German court recognized that companies can be held liable for climate-related harm based on attribution evidence tracing emissions to specific producers.
  - The database was cited in the Inter-American Court of Human Rights' *Advisory Opinion on Climate Emergency and Human Rights* where it was used as evidence that a small group of corporate producers are disproportionately responsible for historical global emissions, supporting the Court's conclusion that states have a duty to regulate corporate climate harms on human-rights grounds.
  - New scientific studies used Carbon Majors data to link corporate emissions to *heatwaves*, *economic losses*, and *sea-level rise*.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 5

Introduction

Background

According to the European Union's *Copernicus Climate Change Service*, 2024 marked the first calendar year in which the global average temperature exceeded 1.5°C above pre-industrial levels (1850-1900). Although this does not yet constitute a breach of the Paris Agreement's long-term limit, which is defined over multi-decadal averages, it serves as a stark warning of the urgent need for climate action. The year also saw a record high in global greenhouse gas emissions of 53.2 $GtCO_2e$[1], up 1.3% from 2023. Meanwhile, global CO_2 emissions from fossil fuels reached approximately 38.6 $GtCO_2$ in 2024, the highest level on record, increasing 1.3% from 2023[2].

The *Production Gap Report 2025* found that, 10 years after the Paris Agreement, governments plan to produce over 120% more fossil fuels in 2030 than would be consistent with the Agreement's 1.5°C goal pathway. Within these plans, fossil fuel production levels exceed 1.5°C-consistent limits by 500% for coal, 31% for oil, and 92% for gas in 2030. Seeking to address this misalignment an EU-led coalition of over 80 countries proposed a roadmap to transition away from fossil fuels at the most recent COP30 in November 2025. The plan was blocked by strong opposition from countries such as Saudi Arabia, Russia, China, and India, highlighting persistent political barriers to accelerating global climate action as reported by the International Institute for Sustainable Development's *Earth Negotiations Bulletin* which is the only organisation authorised to summarise proceedings from UN negotiations closed to the media.

Carbon Majors

First released in 2013[3] by Richard Heede of the Climate Accountability Institute (CAI), the Carbon Majors Database traces emissions from fossil fuel and cement production back to the companies responsible. InfluenceMap now hosts the database on *carbonmajors.org*, making it widely accessible and providing annual updates.

The database focuses on holding major hydrocarbon producers accountable, aggregating emissions data by company rather than by country. This provides a direct link between corporate activity and climate change, helping to identify the small group of companies whose emissions have contributed disproportionately to global warming.

---

[1] *Crippa, M. et al., GHG emissions of all world countries - 2025 Report, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025, doi:10.2760/9816914, JRC143227.*

[2] Global Carbon Budget. *Friedlingstein et al. Earth System Science Data, 2025.*

[3] *Heede, R.* Tracing anthropogenic carbon dioxide and methane emissions to fossil fuel and cement producers, 1854–2010. *Climatic Change* ***122****, 229–241 (2014).*

Since its original release in 2013, Carbon Majors has been widely used in climate litigation, legislation, academic research, regulatory and financial contexts, establishing itself as a key tool for understanding corporate contributions to climate change.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 7

This Year in Climate Accountability

Corporate responsibility is increasingly recognized as central to addressing the climate crisis. This shift is happening through a range of avenues, from legal and legislative efforts to academic and policy-driven initiatives, with the Carbon Majors database providing a foundational basis for accountability in many of these cases.

Legal Cases

According to the Grantham Institute's *Global Trends in Climate Change Litigation: 2025 Snapshot*, at least 226 new climate cases were filed in 2024, 20% of which now target corporations. Notably, the report states that cases against corporate defendants appear to have a higher overall success rate compared to non-corporate defendants, underscoring the growing viability of corporate climate litigation as a strategy.

One example is *Lliuya v. RWE AG*. In this case, Peruvian farmer Saúl Luciano Lliuya sued the German energy company for its contribution to climate change and the risks posed to his community from melting glaciers. In May 2025, Germany's Higher Regional Court of Hamm dismissed the lawsuit, but the decision was significant: it recognized that companies could, in principle, be held liable for climate-related harm and accepted scientific climate attribution evidence connecting corporate emissions to environmental impacts. Central to this evidence was the Carbon Majors database, which allowed the court to trace emissions directly to RWE. While the case did not rule in Lliuya's favor, it set an important precedent for establishing accountability in future climate litigation.

Another landmark case is Odette Survivors v. Shell plc, filed in December 2025 in the High Court of Justice of England & Wales. Survivors of Super Typhoon Odette in the Philippines are suing the energy giant for its contribution to climate change and the resulting destruction in their communities. The case is unprecedented: it applies Filipino law in UK courts and is the first civil claim to directly link polluting companies to deaths and personal injuries that have already occurred in the Global South, rather than future harms or risks.

The database was also cited in the Inter-American Court of Human Rights' *Advisory Opinion on Climate Emergency and Human Rights*, where it was used as evidence that a small group of corporate producers are disproportionately responsible for historical global emissions, supporting the Court's conclusion that states have a duty to regulate corporate climate harms on human-rights grounds. By linking corporate emissions to human rights impacts, Carbon Majors provides a foundation for legal accountability at both national and international levels.

Climate Superfund Legislation

Carbon Majors continues to play a pivotal role in shaping Climate Superfund legislation in the US. These laws are designed to hold major fossil fuel companies financially accountable for the damages caused by their emissions, and to use those funds for mitigation and adaption measures. Two laws have been passed, one in *New York*, requiring $75 billion in payments, and in *Vermont*, where a rough estimates from the Vermont Public Interest Research Group suggested approximately $2.5 billion in recoverable damages. More than a dozen proposals at various stages in other states. In California, for example, analyses suggest the total recoverable damages could reach hundreds of billions of dollars, accounting for wildfires, droughts, sea-level rise, flooding, and adaptation needs through 2045.

Senator Krueger highlighted the importance of the Carbon Majors database during a *press release* for the introduction of the New York bill stating that: “based on the research of Dr. Richard Heede, it is now possible to use company records to determine the amount of product put into the marketplace by each large fossil fuel company and to translate that into an amount of greenhouse gas emitted into the atmosphere. The formula for doing so is specifically written into the bill language.”

Scientific Attribution

Carbon Majors data has been used to link company-level emissions to a range of climate impacts, including extreme heat, economic losses, and sea level rise. *Quilcaille et al. (2025)* used the database to systematically link heatwaves to emissions from major fossil fuel producers. The study found that emissions from any one of the 14 largest companies were sufficient to make more than 50 historical heatwaves virtually impossible without their influence. *Callahan & Mankin (2025)* quantified trillions of dollars in heat-related losses attributable to individual fossil fuel producers, showing that tracing emissions to specific harms is now scientifically feasible and supports climate liability claims. *Sadai et al. (2025)*, found that nearly half of the present-day surface temperature increase and one-third of sea level rise can be traced to the 122 largest fossil fuel producers, highlighting the urgency of phasing out fossil fuels and the intergenerational injustice of their continued use. Carbon Majors is also referenced in *Merner et al.’s 2025 study* highlighting how internal corporate records, emissions data, and attribution science are being used to support lawsuits by states, cities, and tribes for climate damages and fraud.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 9

Methodology

Carbon Majors traces greenhouse gas emissions from fossil fuels and cement produced by companies from as early as 1854 to the present. This section provides a brief overview of the database's methodology. For a more detailed explanation, see the *Methodology page* on the website or refer to Rick Heede's 2014 paper, *Carbon Majors: Methods & Results Report*.

Carbon Majors selects the largest oil, gas, coal, and cement producers based on their emissions. These entities are categorized as either investor-owned, state-owned, or nation-state producers. Nation-state producers are used primarily in the coal sector and are included only when investor-owned or state-owned companies haven't been established or played a minor role in the relevant country.

Production data is obtained for each entity and is primarily based on self-reported figures, with third-party sources used when necessary. This data is standardized to common commodity types, each with a standard unit: Oil & Natural Gas Liquids (million barrels), Natural Gas (billion cubic feet), and Coal (million tonnes). To improve data accuracy, coal production is further categorized by rank, such as bituminous or anthracite, or by utilization, such as thermal or metallurgical.

Emission factors for each fuel type are used to estimate the carbon content released when these fossil fuels are combusted. Applying this factor to the standardized production results in the emissions from the combustion of marketed products, comprising nearly 90% of total emissions tracked by the database. These are Scope 3 Category 11 emissions, corresponding to "use of sold products". Four direct, operational Scope 1 emissions are then estimated: the flaring and venting of CO_2 at oil and gas facilities, fugitive methane from coal, oil, and gas operations, and CO_2 from a producer's own fuel use (mainly gas production). Both Scope 1 and Scope 3 emissions are then aggregated to determine the total emissions for a company in a given year and historically.

Estimation of CO_2 emissions for cement production differs from that for fossil fuel production. Cement emissions are calculated based on process emissions from limestone calcining and exclude fuel and electricity inputs already accounted for by fossil fuel producers.

This research compares the emissions tracked by the Carbon Majors database to total fossil fuel and cement emissions since the beginning of the Industrial Revolution. Data from the Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), and more recently the *Global Carbon Project*, provides this total, amounting to 1,812 $GtCO_2$ from 1750 to 2024. The CO_2 emissions figures obtained from the above calculations (excluding fugitive methane CO_2 equivalent emissions) are compared to this total to calculate entities' relative contributions to total fossil fuel and cement emissions.

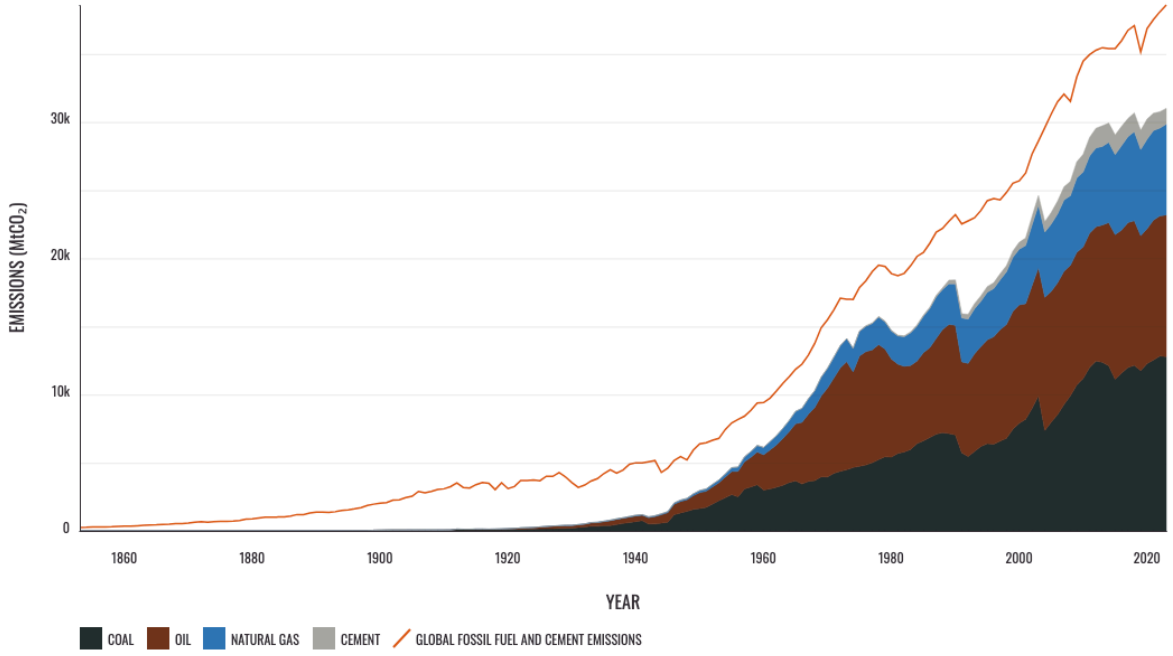
Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 10

Findings

This section presents an analysis of the Carbon Majors database, beginning with emissions in 2024 and a historical overview of the data. It then explores emissions by entity type, examines the continued concentration of emissions among major producers, analyses emissions by region, and concludes with an overview of the climate policy engagement of the largest companies in the database.

The following figure shows the annual CO_2 emissions attributed to the carbon fuels and cement produced by Carbon Majors entities from the beginning of the data records in 1854 to 2024, and compares these to global fossil fuel and cement CO_2 emissions.

Figure 3: Carbon Majors & Global CO_2 Emissions (1854–2024)



Emissions in 2024

In 2024, Carbon Majors traced emissions totalling 34.7 $GtCO_2e$ to the 166 active entities in the database, an increase of 0.8% compared to 2023. The CO_2 emissions tracked account for 80% of global fossil fuel and cement CO_2 emissions in 2024. More than half of these global emissions can be traced to just 32 state- and investor-owned companies, highlighting the concentration of emissions among the largest corporate emitters.

The table below highlights the top 20 highest carbon-emitting entities in 2024. Together, they were responsible for 18 $GtCO_2e$, representing 41.8% of global fossil fuel and cement CO_2 emissions in 2024. The list is largely dominated by state-owned entities, which account for 16 of the top 20. Notably, 8 of the top

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 11

20 entities are Chinese. Coal producers are particularly prominent, with seven represented, six from China and one from India, underscoring Asia's continued dependence on coal.

Table 1: Top 20 Carbon Majors Entities by Emissions (2024)

Entity	Total emissions ($MtCO_2e$)	CO_2 emissions ($MtCO_2$)	Percentage of global CO_2 emissions
Saudi Aramco	1,786	1,653	4.28%
Coal India	1,684	1,513	3.92%
CHN Energy	1,679	1,509	3.91%
National Iranian Oil Company	1,387	1,208	3.13%
Gazprom	1,293	1,065	2.76%
Jinneng Group	1,129	1,014	2.63%
China (Cement)	950	950	2.46%
Rosneft	763	690	1.79%
CNPC	750	655	1.70%
Shandong Energy	750	674	1.74%
China National Coal Group	732	657	1.70%
Shaanxi Coal and Chemical Industry Group	694	624	1.62%
ExxonMobil	677	610	1.58%
Abu Dhabi National Oil Company (ADNOC)	622	564	1.46%
Chevron	577	512	1.33%
Sonatrach	576	488	1.26%
Iraq National Oil Company	549	518	1.34%
Shanxi Coking Coal Group	540	486	1.26%
QatarEnergy	446	369	0.96%
Shell	426	373	0.97%

Note: The total emissions values in the table above include fugitive methane emissions in $MtCO_2$ equivalent units; however, only total CO_2 figures are factored into the calculation of an entity's percentage of total fossil fuel and cement emissions.

Historical Emissions

Carbon Majors traces 1,436 $GtCO_2e$ of cumulative historical emissions from 1854 through 2024 to 178 industrial producers. The CO_2 portion of this total is equivalent to 70% of global fossil fuel and cement CO_2 emissions since the start of the Industrial Revolution in 1750. Over a third of these global CO_2 emissions historically can be attributed to just 22 companies.

The table below shows the top 20 highest carbon producing entities in the database, which collectively account for 872 $GtCO_2e$, representing 42.5% of global historical fossil fuel and cement CO_2 emissions since 1824. The entities in positions 1 to 11 remain unchanged from last year. Significant changes to the top 20 include:

- Core Natural Resources entered the top 20 at number 18, replacing Peabody Energy, which dropped to 21st place. Core Natural Resources is a newly created company formed by the 2025 merger of CONSOL Energy and Arch Resources.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 12

- Entites which moved more than one place in the rankings include: CHN Energy, which rose two places, and Polish coal production (1913-2001) and Abu Dhabi National Oil Compnay (ADNOC), which each dropped two positions.

Table 2: Top 20 Carbon Majors Entities by Emissions (1854–2024)

Entity	Total emissions ($MtCO_2e$)	CO_2 emissions ($MtCO_2$)	Percentage of global CO_2 emissions
Former Soviet Union (1900–1991)	135,113	120,875	6.54%
China (Coal, 1945–2004)	104,888	94,242	5.10%
Saudi Aramco	72,457	67,708	3.66%
Chevron	62,503	56,915	3.08%
ExxonMobil	57,458	51,653	2.79%
Gazprom	53,116	43,034	2.33%
National Iranian Oil Company	45,826	41,645	2.25%
BP	43,231	39,397	2.13%
Shell	41,517	37,267	2.02%
Coal India	35,221	31,646	1.71%
Pemex	26,458	24,180	1.31%
CHN Energy	25,231	22,670	1.23%
China (Cement)	25,111	25,111	1.36%
ConocoPhillips	24,713	21,944	1.19%
Poland (Coal, 1913–2001)	22,695	20,392	1.10%
CNPC	20,434	18,491	1.00%
British Coal Corporation (1947–1994)	19,745	17,741	0.96%
Core Natural Resources	19,189	17,229	0.93%
TotalEnergies	18,572	16,819	0.91%
Abu Dhabi National Oil Company (ADNOC)	18,480	16,925	0.92%

Note: The total emissions values in the table above include fugitive methane emissions in $MtCO_2$ equivalent units; however, only total CO_2 figures are factored into the calculation of an entity's percentage of total fossil fuel and cement emissions.

Emissions by Entity Type

Emissions from the assessed entities are attributed to three types of producers: investor-owned companies, state-owned companies, and nation-state producers. Nation-state producers are included primarily in the coal sector, and only when investor-owned or state-owned companies are not established, play a minor role in the country, or lack sufficient historical production data.

Of the 178 entities assessed, 100 are investor-owned, 72 are state-owned, and 6 are nation-state producers. State-owned companies are the largest contributors to cumulative emissions, despite the greater number of investor-owned companies. Historically, the assessed state-owned companies account for 31.0% of global fossil CO_2 emissions, the investor-owned companies for 24.1% and the nation-state producers for 14.8%.

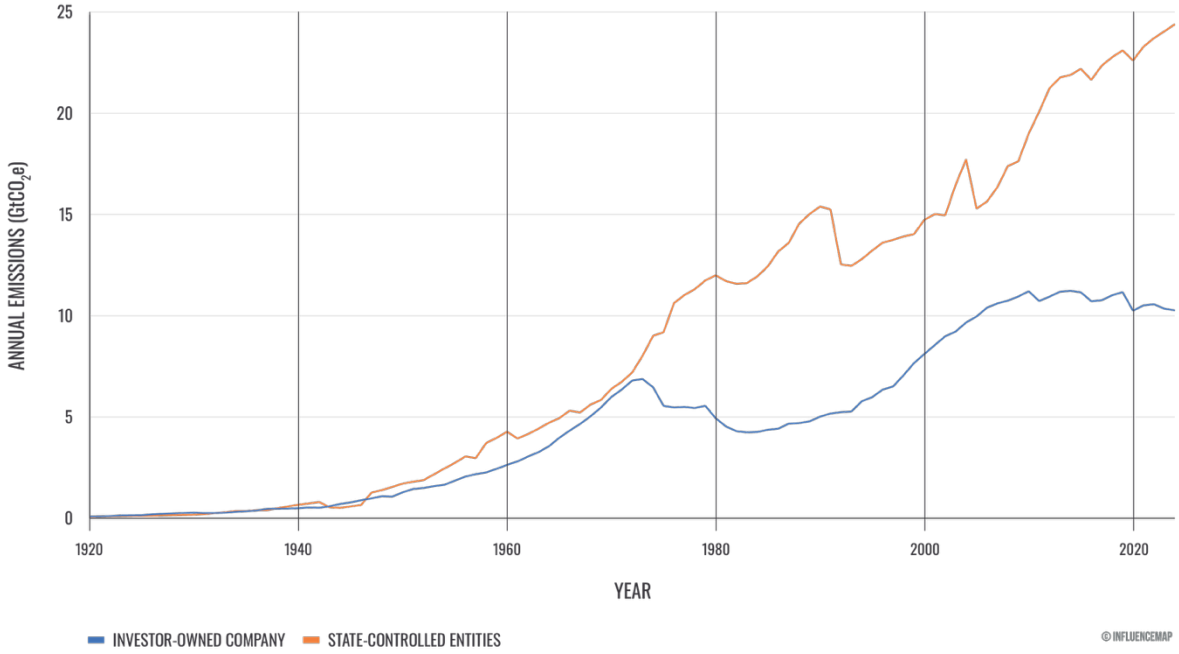
Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 13

In 2024, this pattern is even more pronounced. The 70 active state-owned companies are linked to 53.4% of global fossil CO_2 emissions, compared with 94 investor-owned companies accounting for 23.7% and 2 nation-state producers accounting for 2.6%. This distribution reflects the increasing dominance of state-owned producers in major fossil fuel sectors. Comparing 2024 emissions to 2023, most state-owned companies increased their emissions, with 38 rising and 29 declining. In contrast, among investor-owned companies, more entities reduced emissions, with 54 decreasing and 39 increasing.

The top 5 investor-owned companies, ExxonMobil, Chevron, Shell, BP, and ConocoPhillips, are responsible for a significant portion of global emissions in 2024, with a total of 2.4 $GtCO_2e$ (5.5% of global fossil CO_2 emissions). However, this is still considerably lower than the 7.8 $GtCO_2e$ (18.0% of global fossil CO_2 emissions) linked to the 5 largest state-owned entities in 2024: Saudi Aramco, Coal India, CHN Energy, National Iranian Oil Co., and Gazprom.

Up until around 2011, investor-owned companies were the largest single group in terms of cumulative emissions. Since then, state-owned companies have surpassed investor-owned companies. However, as shown in the graph below, combining state-owned companies and nation-state producers to assess all state-controlled production shows that these entities have consistently accounted for more emissions than investor-owned companies since the 1950s. While investor-owned company emissions dipped in the 1970s during the oil crisis and only recovered in the 1990s, state-controlled emissions have exhibited steady growth across the decades.

Figure 4: Emissions by Entity Type (1920–2024)



The drop in state-controlled emissions after 1991 reflects the disaggregation of Soviet Union production data into individual company records in the Carbon Majors methodology, combined with incomplete

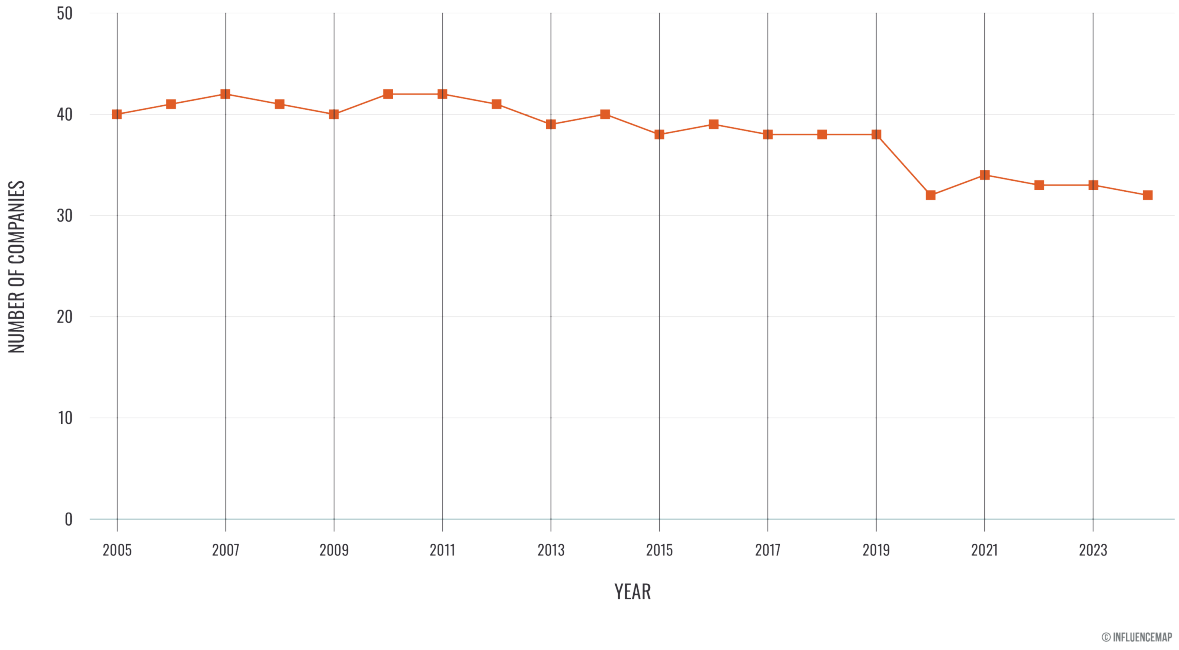
Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 14

company-level data and an actual decline in output during the transition from the USSR to the Russian Federation. Similarly, the spike between 2002 and 2005 is driven by China's rapid production increase in 2003–2004 followed by the disaggregation of national coal production data in the Carbon Majors database into individual Chinese coal companies, whose early historical data do not fully capture total Chinese coal output.

Concentration of Emissions

Previous Carbon Majors releases have highlighted how responsibility for emissions is highly concentrated among a small number of corporate producers. Historically, this is clear: over half of global CO_2 emissions from 1750 to 2024 can be attributed to just 81 companies. Figure 4 below illustrates how this concentration has intensified over time. In 2024, over half of fossil CO_2 emissions can be traced to just 32 state- and investor-owned companies, down from 38 companies five years earlier and consistently above 40 companies between 2005 and 2013. The large drop in 2020 reflects the sharp decline in global emissions during the COVID-19 pandemic. While total emissions from the carbon majors fell slightly that year, most of the reduction came from smaller companies rather than the largest emitters. In fact, the 32 companies responsible for over half of global emissions in 2020 collectively increased their emissions compared to 2019. Smaller producers recovered in 2021 to approximately pre-pandemic levels while the largest emitters continued increasing their emissions.

Figure 5: Number of Companies Linked to 50% of Emissions (2005–2024)



Since 2005, the oil, gas, and coal sectors have undergone significant changes, with both (i) mergers and acquisitions and (ii) organic production growth driving greater concentration of carbon emissions among fewer producers.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 15

Notable mergers and acquisitions since 2005 include:

- The 2007 merger of Statoil and Norsk Hydro, forming Equinor, the eighth largest oil and gas company in the world at the time[4].
- Shell's 2015 acquisition of BG Group for around $70 billion, the largest oil and gas deal since Exxon's acquisition of Mobil in 1998.
- Occidental Petroleum's acquisition of Anadarko Petroleum in 2019, the largest US oil and gas merger since Exxon acquired Mobil.
- Chevron's 2023 announcement of its acquisition of Hess Corporation, solidifying the company as the second-largest corporate producer historically.
- ExxonMobil's 2023 announcement of its acquisition of Pioneer Natural Resources, reinforcing its position as the third-largest corporate producer historically.
- ConocoPhillips' 2024 acquisition of Marathon Oil, together forming the 11th-largest corporate producer in history.
- The formation of Core Natural Resources, now ranked 14th historically, in 2025 as the result of the merger between CONSOL Energy (previously 30th) and Arch Resources (previously 42nd).

Analysis of year-on-year trends in 2024 shows mixed performance among companies. Overall, 83 companies decreased emissions, while 77 increased them, and 4 maintained the same level of emissions. However, the largest companies generally drove the upward trend: almost two thirds of the 32 companies responsible for over half of global emissions in 2024 increased emissions compared to 2023. Only 28% of the bottom half of the ranked entities saw increases, compared with 66% of the top half, highlighting that growth in emissions is concentrated among the largest producers. This pattern of concentration reflects both merger-driven and organic production growth. Under the Carbon Majors methodology, historical production from acquired companies is fully attributed to the acquiring company, meaning mergers and acquisitions consolidate past emissions into larger entities. However, the continued rise in emissions among the largest producers also points to substantial organic expansion of their own production capacity. Overall, the persistence of growth at the top of the ranking suggests that rising concentration is driven not only by corporate consolidation, but also by sustained output growth among the largest companies themselves and, in some cases, by the acquisition of already rapidly expanding producers.

[4] *https://statfjord.industriminne.no/en/2019/11/26/merger-creates-statoilhydro/*

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 16

Regional Emissions

This section analyzes the emissions of both investor-owned and state-owned companies by region, categorizing these entities based on the location of their headquarters: Africa, Asia, Australia, Europe, the Middle East, North America, and South America.

The data highlights clear regional disparities among the top fossil fuel and cement producers. All regions increased emissions from 2023 to 2024, but Asian companies stand out overwhelmingly, contributing 31.9% of global fossil CO_2 emissions in 2024, with over 81% coming from coal. Their 2.2% increase is significant given its massive baseline, and the fact that over half of major Asian companies (58%) increased their emissions in 2024 compared to 2023. The 31 Chinese companies alone account for 22.8% of the global total, while India's six companies were responsible for 5.2%, leaving the remaining 13 Asian companies responsible for 3.8%.

European and North American companies, although responsible for smaller shares (15.2% and 11.2% respectively), also saw notable proportional emissions increases of 3.1% and 2.3%. However, the majority of companies from both regions decreased emissions, again implying increased concentration of emissions among the largest producers in these regions. The Middle East is notable for different reasons: while companies in the region account for 12.9% of global emissions—a comparable share to Europe and North America—these are linked to only 10 companies compared to 50 companies in Europe and 37 in North America.

Smaller-emitting regions present their own concerns. African and South American companies each contribute less than 4% to global emissions, but Afica saw the highest proportional increase of 4.8%, while in South America, only one of the five assessed companies did not increase emissions.

Table 3: Regional Emissions in 2024

Region	Total 2024 emissions ($MtCO_2e$)	Percentage of global CO_2 emissions	Companies with increased emissions	Emissions change from 2023
Africa	1,675	3.8%	3 of 8 (38%)	+4.8%
Asia	13,775	31.9%	29 of 50 (58%)	+2.2%
Australia	274	0.6%	2 of 4 (50%)	+1.5%
Europe	6,682	15.2%	20 of 50 (40%)	+3.1%
Middle East	5,537	12.9%	6 of 10 (60%)	+3.0%
North America	4,856	11.2%	17 of 37 (46%)	+2.3%
South America	847	2.0%	4 of 5 (80%)	+1.4%

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 17

Policy Engagement

Many of the companies tracked by Carbon Majors are among the most oppositional companies to climate regulation globally, as shown by InfluenceMap's *LobbyMap* database. The LobbyMap database scores and ranks over 1000 companies and 330 industry associations on their activities influencing climate change policy using an A+ to F scale.

Investor-owned Companies

As shown in the table below, LobbyMap assesses 9 of the 10 highest-emission investor-owned Carbon Majors companies. Of these 9 companies, 5 score a D or below, indicating unsupportive positions on climate policy. The remaining 4 score only slightly higher at C or C-. 8 out of 9 assessed companies have an engagement intensity score above 24%, indicating active engagement with climate policy. For example, *Chevron* scores an D- with an engagement intensity of 33%, and *ExxonMobil* scores a D with an engagement intensity of 39%, indicating that both companies are highly engaged with and hold unsupportive or oppositional positions on climate-related policy.

Table 4: Top 10 Investor-Owned Companies: LobbyMap Policy Engagement Scores

Investor-owned company	Performance band	Engagement intensity
Chevron	D-	33%
ExxonMobil	D	39%
BP	C-	52%
Shell	C-	54%
ConocoPhillips	E+	26%
Core Natural Resources	-	-
TotalEnergies	C-	38%
Peabody Energy	F	6%
Occidental Petroleum	D-	24%
BHP	C	33%

State-owned Companies

State-owned companies are even more oppositional to climate regulation globally according to *LobbyMap research*. LobbyMap assesses 7 of the 10 highest emitting state-owned Carbon Majors companies. Similarly to investor-owned companies, none scores higher than a C-, while 5 receive scores lower or equal to a D, where D to F indicates increasingly obstructive climate policy engagement.

State-owned companies are also not as transparently engaged as investor-owned companies. The 6 assessed state-owned companies average a 13% engagement intensity compared to 34% for investor-owned companies. *Saudi Aramco*'s D- score with an engagement intensity of 10% is representative of these companies, indicating oppositional positions on climate policy with active engagement.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 18

Table 5: Top 10 State-Owned Companies: LobbyMap Policy Engagement Scores

State-owned company	Performance band	Engagement intensity
Saudi Aramco	D-	10%
Gazprom	E	9%
National Iranian Oil Company	-	-
Coal India	D	9%
Pemex	D-	16%
CHN Energy (Shenhua Energy)	C-	12%
CNPC (PetroChina)	C-	25%
British Coal Corporation	-	-
Abu Dhabi National Oil Company (ADNOC)	D	12%
Petroleos de Venezuela	-	-

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 19

Conclusion

This analysis highlights the concentrated responsibility for global carbon emissions and underscores the critical role of corporate accountability in combating climate change. Historically, 70% of global fossil fuel and cement CO_2 emissions from 1854 through 2024 can be traced to 178 producing entities, with over a third attributeable to just 22 companies. This demonstrates a clear concentration of responsibility among a relatively small number of producers. In recent years, the importance of corporate accountability has grown, particularly as international climate commitments have been unevenly implemented and, in some regions, partially rolled back. Carbon Majors provides a critical foundation for scientific attribution and climate liability, linking emissions directly to individual companies and supporting efforts to hold them responsible for environmental and social harms.

In 2024, the database traced 34.7 $GtCO_2e$ of emissions to 166 active entities, a 0.8% increase from 2023. Just 32 companies, state- and investor-owned, were responsible for over half of global fossil fuel and cement emissions, down from 38 companies five years earlier and consistently above 40 companies between 2005 and 2013, reflecting an intensifying concentration of emissions among the largest producers. State-owned companies now dominate, accounting for 53.4% of global fossil CO_2 emissions in 2024, compared with 23.7% for investor-owned companies, and comprising 16 of the top 20 emitters. Most state-owned companies increased their emissions from 2023, while a greater proportion of investor-owned companies reduced theirs, highlighting the structural shift in global fossil fuel production toward state ownership.

The concentration of emissions among a small number of companies has direct implications for climate accountability. Just as in previous years, the largest producers continue to drive growth in emissions: only 28% of the bottom half of the ranked entities saw increases, compared with 66% of the top half. This pattern of concentration is driven by both mergers and organic production growth, indicating that rising concentration is driven not only by corporate consolidation but also by sustained output growth among the largest companies themselves. This growing concentration strengthens the case for targeted legal and policy interventions, as a limited number of companies are responsible for a disproportionate share of global emissions.

In summary, the Carbon Majors database provides a comprehensive view of both historical and contemporary emissions, revealing how a small number of companies shape global carbon totals. By making corporate responsibility measurable, it supports legal, policy, and scientific efforts to mitigate climate change and underscores the urgent need for targeted interventions and systemic reforms to align industrial production with global climate goals and limit future warming.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 20

Appendix 1: 2024 Emissions

The emissions column in the table below includes four direct production-linked operational emission types (comprising part of Scope 1 emissions) and emissions from the combustion of marketed products (categorized as Scope 3 Category 11: Use of Sold Products). One of the four direct emission types is fugitive methane (see the Methodology for more information), given in CO_2 equivalent units. In the final column, *Percentage of global CO_2 emissions*, the value for fugitive methane is not considered when comparing an entity's total CO_2 emissions to total fossil fuel and cement CO_2 emissions.

Carbon Majors Entities Ranked by Emissions (2024)

	Entity	Total emissions ($MtCO_2e$)	Percentage of global CO_2 emissions
1	Saudi Aramco	1,786	4.28%
2	Coal India	1,684	3.92%
3	CHN Energy	1,679	3.91%
4	National Iranian Oil Company	1,387	3.13%
5	Gazprom	1,293	2.76%
6	Jinneng Group	1,129	2.63%
7	China (Cement)	950	2.46%
8	Rosneft	763	1.79%
9	CNPC	750	1.70%
10	Shandong Energy	750	1.74%
11	China National Coal Group	732	1.70%
12	Shaanxi Coal and Chemical Industry Group	694	1.62%
13	ExxonMobil	677	1.58%
14	Abu Dhabi National Oil Company	622	1.46%
15	Chevron	577	1.33%
16	Sonatrach	576	1.26%
17	Iraq National Oil Company	549	1.34%
18	Shanxi Coking Coal Group	540	1.26%
19	QatarEnergy	446	0.96%
20	Shell	426	0.97%
21	Kuwait Petroleum Corp.	419	1.01%
22	Petrobras	400	0.95%
23	Pemex	378	0.88%
24	BP	354	0.80%
25	ConocoPhillips	352	0.82%
26	TotalEnergies	352	0.81%
27	Nigerian National Petroleum Corp.	337	0.78%
28	Glencore	332	0.77%

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 21

	Entity	Total emissions ($MtCO_2e$)	Percentage of global CO_2 emissions
29	Lukoil	323	0.76%
30	China Huaneng Group	300	0.70%
31	Equinor	296	0.67%
32	CNOOC	293	0.69%
33	Peabody Energy	261	0.61%
34	Petronas	260	0.57%
35	Luan Chemical Group	259	0.60%
36	Novatek	257	0.55%
37	SUEK	256	0.60%
38	Eni	243	0.55%
39	TurkmenGaz	237	0.50%
40	State Power Investment Corporation	219	0.51%
41	Sinopec	214	0.49%
42	Samruk-Kazyna	213	0.50%
43	Liaoning Energy Industry Holding Group	209	0.49%
44	Occidental Petroleum	209	0.49%
45	Canadian Natural Resources	204	0.48%
46	Xinjiang Tianchi Energy	201	0.47%
47	Henan Energy and Chemical Industry Group	198	0.46%
48	Petroleos de Venezuela	192	0.45%
49	Huaihe Energy Holding Group	190	0.44%
50	Expand Energy	181	0.38%
51	Core Natural Resources	181	0.42%
52	Bumi Resources	177	0.41%
53	Sonangol	174	0.42%
54	Surgutneftegas	173	0.42%
55	Huadian Coal Industry Group	170	0.40%
56	Petroleum Development Oman	168	0.39%
57	EQT Corporation	162	0.34%
58	EOG Resources	159	0.37%
59	Inner Mongolia Yitai Group	158	0.37%
60	Petoro	158	0.35%
61	Jizhong Energy Resources	157	0.37%
62	Pertamina	157	0.36%
63	AlamTri Resources	153	0.36%
64	Libya National Oil Corp.	150	0.36%
65	Heilongjiang Longmay Mining Holding Group	139	0.32%
66	Adani Group	139	0.33%
67	Singareni Collieries	138	0.32%

	Entity	Total emissions ($MtCO_2e$)	Percentage of global CO_2 emissions
68	Seriti Resources	134	0.31%
69	Inner Mongolia Dian Tou Energy	130	0.30%
70	Inner Mongolia Huineng Coal and Electricity	126	0.29%
71	Suncor Energy	120	0.30%
72	Cenovus Energy	119	0.28%
73	Kuzbassrazrezugol	118	0.27%
74	ONGC	115	0.26%
75	PTTEP	112	0.24%
76	Egyptian General Petroleum	112	0.25%
77	Huayang New Material Technology Group	112	0.26%
78	Devon Energy	110	0.26%
79	Banpu	110	0.25%
80	Ecopetrol	110	0.26%
81	NTPC	108	0.25%
82	Coterra Energy	105	0.23%
83	BHP	103	0.24%
84	Diamondback Energy	102	0.24%
85	Sasol	97	0.22%
86	Exxaro Resources Ltd	95	0.22%
87	Bapco Energies	95	0.21%
88	Mitsubishi Corporation	92	0.21%
89	Kailuan Group	91	0.21%
90	Tourmaline Oil	91	0.19%
91	INPEX	90	0.21%
92	Ovintiv	89	0.20%
93	Repsol	89	0.19%
94	Antero Resources	88	0.19%
95	Eurasian Resources Group	88	0.20%
96	Elgaugol	82	0.19%
97	Tatneft	82	0.20%
98	Alliance Resource Partners	81	0.19%
99	Woodside Energy	79	0.17%
100	China Pingmei Shenma Holding Group	79	0.18%
101	YPF	75	0.17%
102	American Consolidated Natural Resources	74	0.17%
103	Uzbekneftegaz	72	0.15%
104	Navajo Transitional Energy Company	72	0.17%
105	PetroEcuador	70	0.17%
106	APA Corporation	68	0.16%

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 23

	Entity	Total emissions ($MtCO_2e$)	Percentage of global CO_2 emissions
107	Continental Resources	65	0.15%
108	Sibanthracite Group	62	0.14%
109	North Korea	61	0.14%
110	RWE	59	0.14%
111	Whitehaven Coal	57	0.13%
112	Inner Mongolia Mengtai Group	57	0.13%
113	Mubadala	56	0.13%
114	Huaibei Mining Group	56	0.13%
115	Huating Coal Industry Group	55	0.13%
116	EVRAZ	55	0.13%
117	Inner Mongolia Yidong Resources Group	54	0.13%
118	ARC Resources	54	0.12%
119	UltraTech Cement	53	0.14%
120	PGE Group	52	0.12%
121	OMV	51	0.12%
122	Xuzhou Mining Group	50	0.12%
123	DTEK	50	0.11%
124	Anglo American	47	0.11%
125	Polska Grupa Gornicza (PGG)	46	0.11%
126	Holcim Group	46	0.12%
127	Stroyservis	42	0.10%
128	Guizhou Panjiang Coal Power Group	42	0.10%
129	Alpha Metallurgical Resources	42	0.10%
130	En+ Group	41	0.10%
131	Heidelberg Materials	40	0.10%
132	CNX Resources	40	0.08%
133	Teck Resources	37	0.09%
134	Naftogaz	36	0.07%
135	Santos	34	0.07%
136	BASF	34	0.07%
137	JSW	34	0.08%
138	Orlen	32	0.07%
139	NACCO Industries	31	0.07%
140	SDS Coal	30	0.07%
141	Murphy Oil	28	0.06%
142	Mechel	28	0.07%
143	SM Energy	28	0.06%
144	Severstal	25	0.06%
145	Novaya Gornaya	24	0.06%

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 24

	Entity	Total emissions ($MtCO_2e$)	Percentage of global CO_2 emissions
146	Russian Coal	24	0.06%
147	LW Bogdanka	21	0.05%
148	Kazakhmys Holding Group	20	0.05%
149	TALTEK	20	0.05%
150	Severoceske doly	19	0.04%
151	Cemex	17	0.04%
152	CRH	15	0.04%
153	Wolverine Fuels	15	0.04%
154	Kuzbasskaya Toplivnaya	14	0.03%
155	Poludniowy Koncern Weglowy	13	0.03%
156	Metinvest	13	0.03%
157	Taiheiyo Cement	12	0.03%
158	Westmoreland Mining	12	0.03%
159	Kiewit Mining Group	12	0.03%
160	Vistra	11	0.03%
161	Syrian Petroleum	10	0.02%
162	Sev.en Group	9	0.02%
163	Tullow Oil	9	0.02%
164	Obsidian Energy	6	0.01%
165	OKD	6	0.01%
166	Sokolovska uhelna	3	0.01%

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 25

Appendix 2: Historical Emissions (1854–2024)

The emissions column in the table below includes four direct production-linked operational emission types (comprising part of Scope 1 emissions) and emissions from the combustion of marketed products (categorized as Scope 3 Category 11: Use of Sold Products). One of the four direct emission types is fugitive methane (see the Methodology for more information), given in CO_2 equivalent units. In the final column, *Percentage of global CO_2 emissions*, the value for fugitive methane is not considered when comparing an entity's total CO_2 emissions to total fossil fuel and cement CO_2 emissions.

Carbon Majors Entities Ranked by Emissions (1854–2024)

	Entity	Emissions ($MtCO_2e$)	Percentage of global CO_2 emissions
1	Former Soviet Union	135,113	6.54%
2	China (Coal)	104,888	5.10%
3	Saudi Aramco	72,457	3.66%
4	Chevron	62,503	3.08%
5	ExxonMobil	57,458	2.79%
6	Gazprom	53,116	2.33%
7	National Iranian Oil Company	45,826	2.25%
8	BP	43,231	2.13%
9	Shell	41,517	2.02%
10	Coal India	35,221	1.71%
11	Pemex	26,458	1.31%
12	CHN Energy	25,231	1.23%
13	China (Cement)	25,111	1.36%
14	ConocoPhillips	24,713	1.19%
15	Poland (Coal, 1913,Äì2001)	22,695	1.10%
16	CNPC	20,434	1.00%
17	British Coal Corporation (1947-1994)	19,745	0.96%
18	Core Natural Resources	19,189	0.93%
19	TotalEnergies	18,572	0.91%
20	Abu Dhabi National Oil Company	18,480	0.92%
21	Peabody Energy	18,283	0.89%
22	Petroleos de Venezuela	17,265	0.86%
23	Kuwait Petroleum Corp.	16,757	0.85%
24	Iraq National Oil Company	16,390	0.84%
25	Rosneft	16,340	0.82%
26	Sonatrach	16,091	0.75%
27	Jinneng Group	14,493	0.70%
28	Occidental Petroleum	13,382	0.65%

	Entity	Emissions ($MtCO_2e$)	Percentage of global CO_2 emissions
29	Petrobras	11,611	0.58%
30	Shandong Energy	11,291	0.55%
31	BHP	11,264	0.55%
32	Nigerian National Petroleum Corp.	10,768	0.54%
33	China National Coal Group	9,882	0.48%
34	Eni	9,686	0.46%
35	Czechoslovakia (Coal, 1938-1992)	9,618	0.47%
36	QatarEnergy	9,348	0.44%
37	Petronas	9,260	0.43%
38	Pertamina	8,582	0.42%
39	Lukoil	8,491	0.43%
40	Libya National Oil Corp.	8,430	0.43%
41	Equinor	8,332	0.40%
42	Anglo American	8,260	0.40%
43	RWE	7,708	0.37%
44	Shanxi Coking Coal Group	7,556	0.37%
45	Shaanxi Coal and Chemical Industry Group	7,414	0.36%
46	Glencore	6,974	0.34%
47	Rio Tinto (1959-2018)	6,767	0.33%
48	Alpha Metallurgical Resources	6,215	0.30%
49	ONGC	6,150	0.30%
50	SUEK	5,331	0.26%
51	Sasol	5,187	0.25%
52	Surgutneftegas	5,090	0.26%
53	TurkmenGaz	4,820	0.21%
54	Repsol	4,766	0.23%
55	Petroleum Development Oman	4,726	0.23%
56	CNOOC	4,715	0.23%
57	North Korea	4,653	0.23%
58	Egyptian General Petroleum	4,559	0.22%
59	Petoro	4,479	0.21%
60	Henan Energy and Chemical Industry Group	4,387	0.21%
61	Sinopec	4,373	0.22%
62	China Huaneng Group	4,368	0.21%
63	Samruk-Kazyna	4,315	0.21%
64	Luan Chemical Group	4,178	0.20%
65	State Power Investment Corporation	4,139	0.20%
66	Bumi Resources	4,123	0.20%
67	Jizhong Energy Resources	3,919	0.19%

	Entity	Emissions ($MtCO_2e$)	Percentage of global CO_2 emissions
68	Sonangol	3,715	0.19%
69	Uzbekneftegaz	3,610	0.16%
70	Novatek	3,601	0.16%
71	Singareni Collieries	3,569	0.17%
72	Devon Energy	3,536	0.16%
73	Huaihe Energy Holding Group	3,453	0.17%
74	Huayang New Material Technology Group	3,391	0.16%
75	Ecopetrol	3,314	0.17%
76	Suncor Energy	3,301	0.17%
77	Holcim Group	3,265	0.18%
78	Liaoning Energy Industry Holding Group	3,177	0.15%
79	Ovintiv	3,175	0.15%
80	Canadian Natural Resources	3,078	0.15%
81	Expand Energy	3,046	0.13%
82	Ukrainian Ministry of Energy (Coal, 1992-	2,885	0.14%
83	Kuzbassrazrezugol	2,813	0.14%
84	Kailuan Group	2,632	0.13%
85	Polska Grupa Gornicza (PGG)	2,586	0.13%
86	Cyprus AMAX Minerals (1969-1998)	2,569	0.12%
87	Heilongjiang Longmay Mining Holding Group	2,562	0.12%
88	Inner Mongolia Yitai Group	2,541	0.12%
89	American Consolidated Natural Resources	2,437	0.12%
90	Westmoreland Mining	2,404	0.12%
91	BASF	2,398	0.11%
92	AlamTri Resources	2,357	0.11%
93	Exxaro Resources Ltd	2,345	0.11%
94	Bapco Energies	2,317	0.11%
95	Inner Mongolia Dian Tou Energy	2,227	0.11%
96	Cenovus Energy	2,210	0.11%
97	Mitsubishi Corporation	2,200	0.10%
98	APA Corporation	2,193	0.10%
99	YPF	2,186	0.10%
100	Banpu	2,158	0.10%
101	China Pingmei Shenma Holding Group	2,149	0.10%
102	Tatneft	2,144	0.11%
103	Eurasian Resources Group	2,143	0.10%
104	EOG Resources	2,113	0.10%
105	PetroEcuador	2,062	0.11%
106	Alliance Resource Partners	1,945	0.09%

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO7, Página 28

	Entity	Emissions ($MtCO_2e$)	Percentage of global CO_2 emissions
107	Heidelberg Materials	1,764	0.10%
108	INPEX	1,736	0.08%
109	Kiewit Mining Group	1,723	0.08%
110	NACCO Industries	1,707	0.08%
111	Inner Mongolia Huineng Coal and Electricity	1,695	0.08%
112	Huadian Coal Industry Group	1,694	0.08%
113	Syrian Petroleum	1,651	0.08%
114	Teck Resources	1,591	0.08%
115	Huaibei Mining Group	1,533	0.07%
116	EVRAZ	1,486	0.07%
117	Cloud Peak (2009-2019)	1,476	0.07%
118	PGE Group	1,433	0.07%
119	DTEK	1,424	0.07%
120	Vistra	1,416	0.07%
121	Coterra Energy	1,393	0.06%
122	Mechel	1,380	0.07%
123	Naftogaz	1,322	0.06%
124	EQT Corporation	1,309	0.06%
125	PTTEP	1,294	0.06%
126	Inner Mongolia Yidong Resources Group	1,276	0.06%
127	Guizhou Panjiang Coal Power Group	1,234	0.06%
128	Xuzhou Mining Group	1,175	0.06%
129	Inner Mongolia Mengtai Group	1,151	0.06%
130	OMV	1,120	0.05%
131	Diamondback Energy	1,081	0.05%
132	Woodside Energy	1,074	0.05%
133	Huating Coal Industry Group	994	0.05%
134	Santos	915	0.04%
135	En+ Group	907	0.04%
136	Cemex	905	0.05%
137	SDS Coal	901	0.04%
138	UK Coal (1995-2015)	882	0.04%
139	Tourmaline Oil	881	0.04%
140	JSW	853	0.04%
141	Murphy Oil	822	0.04%
142	Orlen	806	0.04%
143	Mubadala	791	0.04%
144	Antero Resources	782	0.04%
145	Severstal	748	0.04%

	Entity	Emissions ($MtCO_2e$)	Percentage of global CO_2 emissions
146	Novaya Gornaya	675	0.03%
147	Xinjiang Tianchi Energy	649	0.03%
148	Metinvest	646	0.03%
149	ARC Resources	640	0.03%
150	Seriti Resources	608	0.03%
151	Taiheiyo Cement	605	0.03%
152	Russian Coal	598	0.03%
153	Continental Resources	587	0.03%
154	Adani Group	576	0.03%
155	Navajo Transitional Energy Company	572	0.03%
156	Sibanthracite Group	541	0.03%
157	Kazakhmys Holding Group	533	0.03%
158	Whitehaven Coal	522	0.03%
159	UltraTech Cement	518	0.03%
160	Stroyservis	479	0.02%
161	Kuzbasskaya Toplivnaya	464	0.02%
162	Severoceske doly	462	0.02%
163	ArcelorMittal (2000-2023)	458	0.02%
164	LW Bogdanka	452	0.02%
165	Wolverine Fuels	413	0.02%
166	SM Energy	376	0.02%
167	Obsidian Energy	366	0.02%
168	OKD	357	0.02%
169	NTPC	351	0.02%
170	Vale (2007-2022)	317	0.02%
171	CNX Resources	307	0.01%
172	Elgaugol	284	0.01%
173	CRH	256	0.01%
174	Sev.en Group	253	0.01%
175	Poludniowy Koncern Weglowy	250	0.01%
176	Tullow Oil	229	0.01%
177	TALTEK	223	0.01%
178	Sokolovska uhelna	209	0.01%

TRADUTOR PÚBLICO JURAMENTADO
Sworn Public Translator
Matrícula Jucerja n°143
Av. Almirante Barroso Nº 63 - Sala 1905
Tels.:2 240-6427/2240-1707 - Fax: 2240-6477
E-mail: tegami@ecrj.com.br
Rio de Janeiro - Brasil - CEP 20.036-900

Eu, abaixo assinada, tradutora pública juramentada e intérprete comercial nesta cidade do Rio de Janeiro, certifico que me foi apresentado um documento em INGLÊS, o qual passo a traduzir para o vernáculo, em razão do meu ofício, como segue:

TRADUÇÃO Nº 0815/2026



CarbonMajors

Atualização de Dados 2024

Janeiro de 2026

PÁGIN

CarbonMajors

Índice

Sumário Executivo....2

Introdução....4

Este ano na Responsabilização Climática....6

Metodologia....8

Descobertas....9

Conclusão....18

Apêndice 1: Emissões de 2024....19

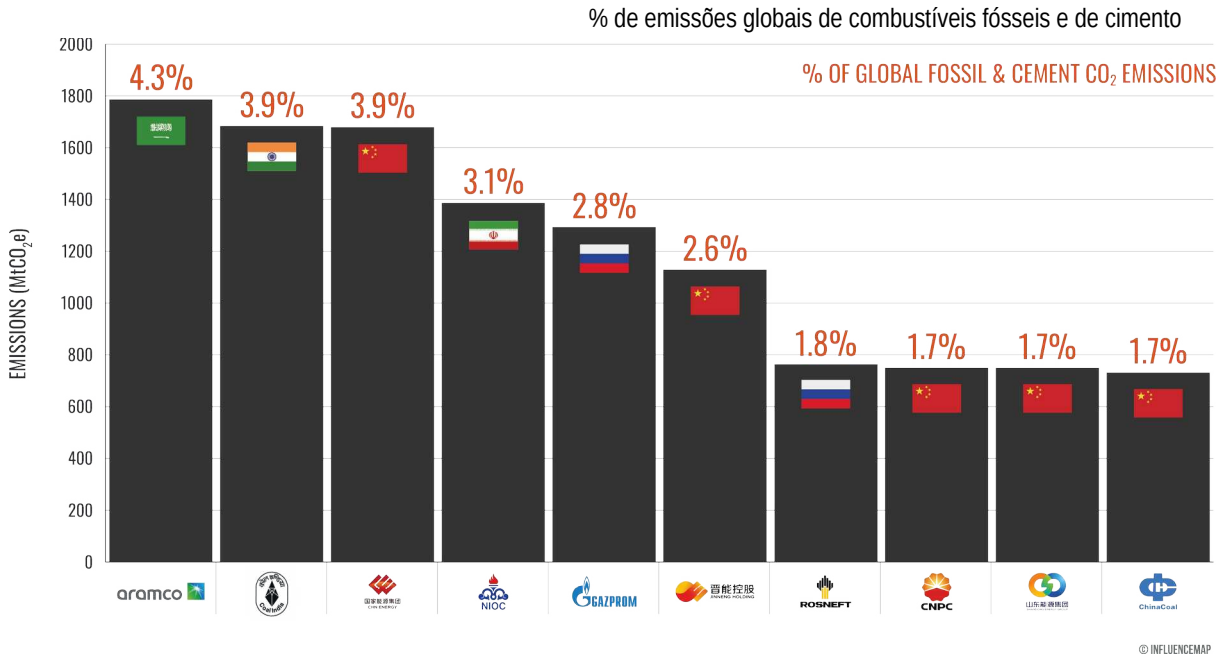
Apêndice 2: Emissões Históricas (1854–2024)....24

CarbonMajors

SUMÁRIO EXECUTIVO

- O banco de dados da Carbon Majors registra 34,7 $GtCO_{2e}$ de emissões de gases de efeito estufa em 2024 para 166 produtores de petróleo, gás, carvão e cimento, um aumento de 0,8% em relação às emissões totais dessas entidades em 2023. Apenas 32 empresas foram vinculadas a mais da metade das emissões globais de CO2 de combustíveis fósseis e cimento em 2024. Como mostrado na Figura 1, as 10 maiores empresas por emissões, responsáveis cumulativamente por 27,6% das emissões globais de CO2 fóssil em 2024, eram todas empresas 100% estatais ou majoritárias do estado.

Figura 1: Top 10 Empresas por Emissões (2024)



- A Carbon Majors é um banco de dados de dados históricos de produção de 178 dos maiores produtores mundiais de petróleo, gás, carvão e cimento, compostos por 166 entidades ativas e 12 inativas. Esses dados são usados para quantificar as emissões operacionais diretamente ligadas à produção e as emissões da combustão dos produtos comercializados que podem ser atribuídas a essas entidades. O banco de dados é atualizado anualmente e está disponível em *carbonmajors.org*. Este briefing apresenta os dados atualizados para o ano de relatório de 2024.

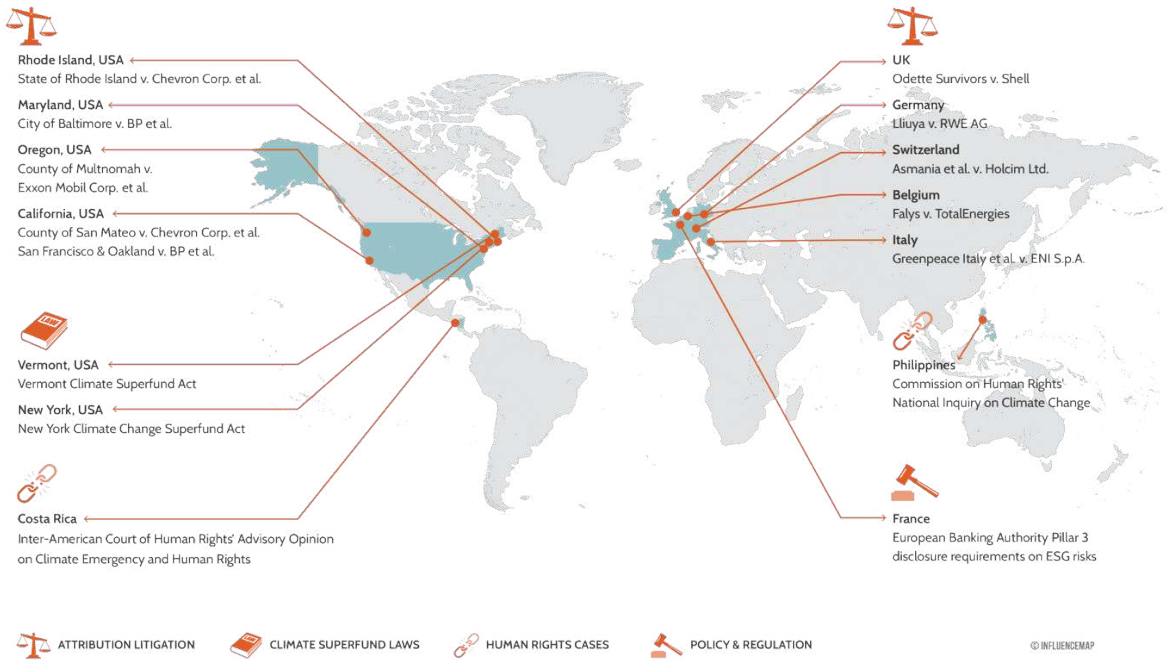
- Empresas estatais dominaram as emissões globais de combustíveis fósseis em 2024. O banco de dados mostra que empresas estatais foram responsáveis por 54,0% das emissões, enquanto 93 empresas de capital privado responderam por 23,7%. Essa análise também mostra que a maioria das empresas estatais (54%) aumentou as emissões ano a ano, enquanto a maioria das empresas de capital privado (57%) reduziu as suas.

- As emissões estão cada vez mais concentradas em um número menor de empresas. Em 2024, apenas 32 empresas eram responsáveis por mais da metade das emissões globais de CO_2 fóssil,

uma queda em relação aos 38 cinco anos antes. Dois terços das empresas na metade superior do ranking aumentaram suas emissões de 2023 a 2024, em comparação com apenas 28% das entidades na metade inferior, com crescimento entre as maiores entidades

impulsionado tanto por fusões quanto por aquisições e pela contínua expansão da produção.

Figura 2: Carbon Majors: Instrumentos Jurídicos e casos de usos de Políticas



- Em 2025, os mecanismos de responsabilização baseados em emissões corporativas históricas continuaram a ganhar ritmo, com o banco de dados Carbon Majors servindo como um recurso evidenciário central:

  - Até 75 bilhões de dólares em pagamentos potenciais por danos climáticos estão sendo solicitados pelo Estado de Nova York dos EUA junto a produtores de combustíveis fósseis em seu *Climate Superfund Bill*, com o banco de dados Carbon Majors ajudando a quantificar a ligação entre as emissões das empresas e os danos climáticos. A legislação Superfund também foi aprovada em *Vermont*, e mais de uma dúzia de estados adicionais estão avançando com projetos semelhantes exigindo que grandes empresas de combustíveis fósseis paguem por danos relacionados às suas emissões.

  - A Carbon Majors teve papel de destaque no caso alemão de direito de responsabilidade civil e litígios climáticos Lliuya v. RWE, onde um tribunal alemão reconheceu que empresas podem ser responsabilizadas por danos relacionados ao clima com base em evidências de atribuição que rastreiam emissões até produtores específicos.

  - O banco de dados foi citado no Parecer Consultivo sobre Clima da Côrte Interamericana de Direitos Humanos, Emergência e Direitos Humanos, onde foi usado como evidência de que um pequeno grupo de

produtores corporativos é desproporcionalmente responsável pelas emissões globais históricas, apoiando a conclusão da Corte de que os Estados têm o dever de regular os danos ao clima corporativo com base em direitos humanos.

- Novos estudos científicos usaram dados da Carbon Majors para relacionar as emissões corporativas a *ondas de calor*, *perdas* econômicas e *elevação do nível do mar*.

INTRODUÇÃO: Contexto

De acordo com o Serviço Copernicus de Mudanças Climáticas *da União Europeia*, 2024 marcou o primeiro ano civil em que a temperatura média global ultrapassou 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (1850-1900). Embora isso ainda não constitua uma violação do limite de longo prazo do Acordo de Paris, que é definido em médias de múltiplos décadas, serve como um alerta claro sobre a necessidade urgente de ação climática. O ano também registrou um recorde nas emissões globais de gases de efeito estufa de 53,2 $GtCO_2$[e 1], um aumento de 1,3% em relação a 2023. Enquanto isso, as emissões globais de CO_2 de combustíveis fósseis atingiram aproximadamente 38,6 $GtCO_2$ em 2024, o nível mais alto já registrado, aumentando 1,3% em relação a 2023[2]

O *Relatório da Gap de Produção 2025* constatou que, 10 anos após o Acordo de Paris, os governos planejam produzir mais de 120% de combustíveis fósseis em 2030 do que seria consistente com a meta de 1,5°C do Acordo. Dentro desses planos, os níveis de produção de combustíveis fósseis excedem os limites consistentes de 1,5°C em 500% para carvão, 31% para petróleo e 92% para gás em 2030. Buscando resolver esse desalinhamento, uma coalizão liderada pela UE de mais de 80 países propôs um roteiro para a transição dos combustíveis fósseis na COP30 mais recente, em novembro de 2025. O plano foi bloqueado por forte oposição de países como Arábia Saudita, Rússia, China e Índia, destacando barreiras políticas persistentes à aceleração da ação climática global, conforme relatado pelo Boletim de Negociações da Terra *do Instituto Internacional para o Desenvolvimento Sustentável* — que é a única organização autorizada a resumir os procedimentos das negociações da ONU fechadas à mídia.

Carbon Majors

Lançado pela primeira vez em 2013[31] por Richard Heede, do Climate Accountability Institute (CAI), o Banco de Dados da Carbon Majors rastreia as emissões da produção de combustíveis fósseis e cimento até as empresas responsáveis. O InfluenceMap agora hospeda o banco de dados no *carbonmajors.org*, tornando-o amplamente acessível e fornecendo atualizações anuais.

O banco de dados foca em responsabilizar os principais produtores de hidrocarbonetos, agregando dados de emissões por empresa e não por país. Isso cria uma ligação direta entre a atividade corporativa e as mudanças climáticas, ajudando a identificar o pequeno grupo de empresas cujas emissões contribuíram desproporcionalmente para o aquecimento global.

---

[1] Crippa,M.et al., GHG emissions of all worl countries – 2025 Report, Publications Office of the European Unuin, Luxembourg, 2025,doi:10.2760/9816914,JRC143227.

[2] Global Carbon Budget, Friedlingstein et al. Earth System Science Data, 2025.

[3] Heede, R. Tracing anthropogenic carbon dioxide and methane emissions to fóssil fuel and cement producers, 1854-2010, Climatic Change 122, 229-241(2014).

Desde seu lançamento original em 2013, o Carbon Majors tem sido amplamente utilizado em litígios climáticos, legislação, pesquisa acadêmica, contextos regulatórios e financeiros, estabelecendo-se como uma ferramenta chave para entender as contribuições corporativas para as mudanças climáticas.

ESTE ANO EM TERMOS DE RESPONSABILIZAÇÃO CLIMÁTICA:

A responsabilidade corporativa é cada vez mais reconhecida como central para enfrentar a crise climática. Essa mudança está acontecendo por diversos caminhos, desde esforços legais e legislativos até iniciativas acadêmicas e orientadas por políticas públicas, com o banco de dados da Carbon Majors fornecendo uma base fundamental para a responsabilização em muitos desses casos.

Casos Jurídicos

De acordo com o Instituto Grantham *Tendências Globais em Litígios por Mudanças Climáticas: Panorama 2025*, pelo menos 226 novos casos climáticos foram registrados em 2024, dos quais 20% agora têm como alvo corporações. Mais especificamente, o relatório afirma que casos contra réus corporativos parecem ter uma taxa geral de sucesso maior em comparação com réus não corporativos, ressaltando a crescente viabilidade do litígio climático corporativo como estratégia.

Um exemplo é *Lliuya v. RW AG.* Neste caso, o agricultor peruano Saúl Luciano Lliuya processou a empresa alemã de energia por sua contribuição para as mudanças climáticas e pelos riscos representados para sua comunidade pelo derretimento das geleiras. Em maio de 2025, o Tribunal Regional Superior de Hamm, da Alemanha, rejeitou a ação, mas a decisão foi significativa: reconheceu que as empresas poderiam, em princípio, ser responsabilizadas por danos relacionados ao clima e aceitou evidências científicas de atribuição climática que conectam as emissões corporativas aos impactos ambientais. Fundamental nessas evidências estava o banco de dados Carbon Majors, que permitia ao tribunal rastrear as emissões diretamente até a RWE. Embora o caso não tenha decidido a favor de Lliuya, estabeleceu um precedente importante para estabelecer responsabilidade em futuros litígios climáticos.

Outro caso marcante é o de Odette Survivors v. Shell plc, registrada em dezembro de 2025 no Tribunal Superior de Justiça da Inglaterra e País de Gales. Sobreviventes do Super Tufão Odette nas Filipinas estão processando a gigante de energia por sua contribuição para as mudanças climáticas e pela destruição resultante em suas comunidades. O caso é sem precedentes: ele aplica a lei filipina nos tribunais do Reino Unido e é a primeira ação civil a ligar diretamente empresas poluentes a mortes e lesões pessoais que já ocorreram no Sul Global, em vez de danos ou riscos futuros.

O banco de dados também foi citado no Parecer Consultivo da Corte Interamericana de Direitos Humanos *« sobre Emergência Climática e Direitos Humanos*

, onde foi usada como evidência de que um pequeno grupo de produtores corporativos é desproporcionalmente responsável pelas emissões globais históricas, apoiando a conclusão da Corte de que os Estados têm o dever de regular os danos ao clima corporativo com base em direitos humanos. Ao vincular as emissões corporativas aos impactos dos direitos humanos, a Carbon Majors oferece uma base para a responsabilidade legal tanto em nível nacional quanto internacional.

Legislação do Superfundo Climático

A Carbon Majors continua desempenhando um papel fundamental na formação da legislação do Climate Superfund nos EUA. Essas leis foram criadas para responsabilizar financeiramente as grandes empresas de combustíveis fósseis pelos danos causados por suas emissões e para usar esses fundos em medidas de mitigação e adaptação. Duas leis foram aprovadas, uma em *Nova York*, exigindo pagamentos de US$ 75 bilhões, e em *Vermont*, onde estimativas aproximadas do Vermont Public Interest Research Group sugeriam aproximadamente US$ 2,5 bilhões em danos recuperáveis.
E mais de uma dúzia de propostas em diferentes estágios em outros estados. Na Califórnia, por exemplo, análises sugerem que os danos totais recuperáveis podem atingir centenas de bilhões de dólares, levando em conta incêndios florestais, secas, elevação do nível do mar, inundações e necessidades de adaptação até 2045.

O senador Krueger destacou a importância do banco de dados Carbon Majors durante um *comunicado* à imprensa para a introdução do projeto de lei de Nova York, afirmando que: "com base na pesquisa do Dr. Richard Heede, agora é possível usar registros da empresa para determinar a quantidade de produto colocada no mercado por cada grande empresa de combustíveis fósseis e traduzir isso em uma quantidade de gases de efeito estufa emitidos na atmosfera. A fórmula para isso está especificamente escrita na linguagem do projeto de lei."

A Atribuição Científica

Os dados da Carbon Majors têm sido usados para relacionar as emissões em nível de empresa a uma variedade de impactos climáticos, incluindo calor extremo, perdas econômicas e elevação do nível do mar. *Quilcaille et al. (2025)* utilizou o banco de dados para vincular sistematicamente ondas de calor às emissões dos principais produtores de combustíveis fósseis. O estudo constatou que as emissões de qualquer uma das 14 maiores empresas eram suficientes para tornar mais de 50 ondas de calor históricas praticamente impossíveis sem sua influência. *Callahan & Mankin (2025)* quantificaram trilhões de dólares em perdas relacionadas ao calor atribuídas a produtores individuais de combustíveis fósseis, mostrando que rastrear as emissões até danos específicos agora é cientificamente viável e apoia reivindicações de responsabilidade climática. *Sadai et al. (2025*) descobriram que quase metade do aumento atual da temperatura superficial e um terço do aumento do nível do mar podem ser atribuídos aos 122 maiores produtores de combustíveis fósseis, destacando a urgência de eliminar gradualmente os combustíveis fósseis e a injustiça intergeracional de seu uso contínuo. A Carbon Majors também é mencionada *no estudo de Merner et al. de 2025,* destacando como registros corporativos internos, dados de emissões e ciência da atribuição estão sendo usados para apoiar processos judiciais movidos por estados, cidades e tribos por danos climáticos e fraudes.

METODOLOGIA

A Carbon Majors traça as emissões de gases de efeito estufa provenientes de combustíveis fósseis e

cimento produzidos por empresas desde 1854 até o presente. Esta seção oferece uma breve visão geral da metodologia do banco de dados. Para uma explicação mais detalhada, veja a *página de Metodologia* no site ou consulte o artigo de Rick Heede de 2014, *Carbon Majors: Methods & Results Report*

A Carbon Majors seleciona os maiores produtores de petróleo, gás, carvão e cimento com base em suas emissões. Essas entidades são categorizadas como produtoras de propriedade de investidores, estatais ou de estados-nação. Produtores de estados-nação são usados principalmente no setor de carvão e são incluídos apenas quando empresas de propriedade de investidores ou estatais não foram estabelecidas ou desempenharam um papel menor no país relevante.

A produção de dados é obtida para cada entidade e são baseados principalmente em números auto reportados, sendo usadas fontes de terceiros quando necessário. Esses dados são padronizados para tipos comuns de commodities, cada um com uma unidade padrão: Petróleo e Gás Natural Líquidos (milhões de barris), Gás Natural (bilhões de pés cúbicos) e Carvão (milhões de toneladas). Para melhorar a precisão dos dados, a produção de carvão é ainda categorizada por categoria, como betuminosa ou antracito, ou por utilização, como térmica ou metalúrgica.

Fatores de emissão para cada tipo de combustível são usados para estimar o teor de carbono liberado quando esses combustíveis fósseis são queimados. Aplicar esse fator à produção padronizada resulta nas emissões da combustão dos produtos comercializados, representando quase 90% das emissões totais monitoradas pelo banco de dados.
Essas são as emissões do Escopo 3 Categoria 11, correspondentes ao "uso de produtos vendidos". Quatro emissões diretas e operacionais de Escopo 1 são então estimadas: a queima e liberação de CO_2 em instalações de petróleo e gás, metano fugitivo das operações de carvão, petróleo e gás, e CO_2 do uso próprio de combustível do produtor (principalmente produção de gás). Tanto as emissões do Escopo 1 quanto do Escopo 3 são então agregadas para determinar o total de emissões de uma empresa em um determinado ano e historicamente.

A estimativa das emissões de CO2 para a produção de cimento difere da produção de combustíveis fósseis. As emissões de cimento são calculadas com base nas emissões do processo da calcinação do calcário e excluem os insumos de combustível e eletricidade já contabilizados pelos produtores de combustíveis fósseis.

Esta pesquisa compara as emissões monitoradas pelo banco de dados Carbon Majors com as emissões totais de combustíveis fósseis e cimento desde o início da Revolução Industrial. Dados do Centro de Análise de Informação sobre Dióxido de Carbono (CDIAC), e mais recentemente do *Projeto Global de Carbono*,

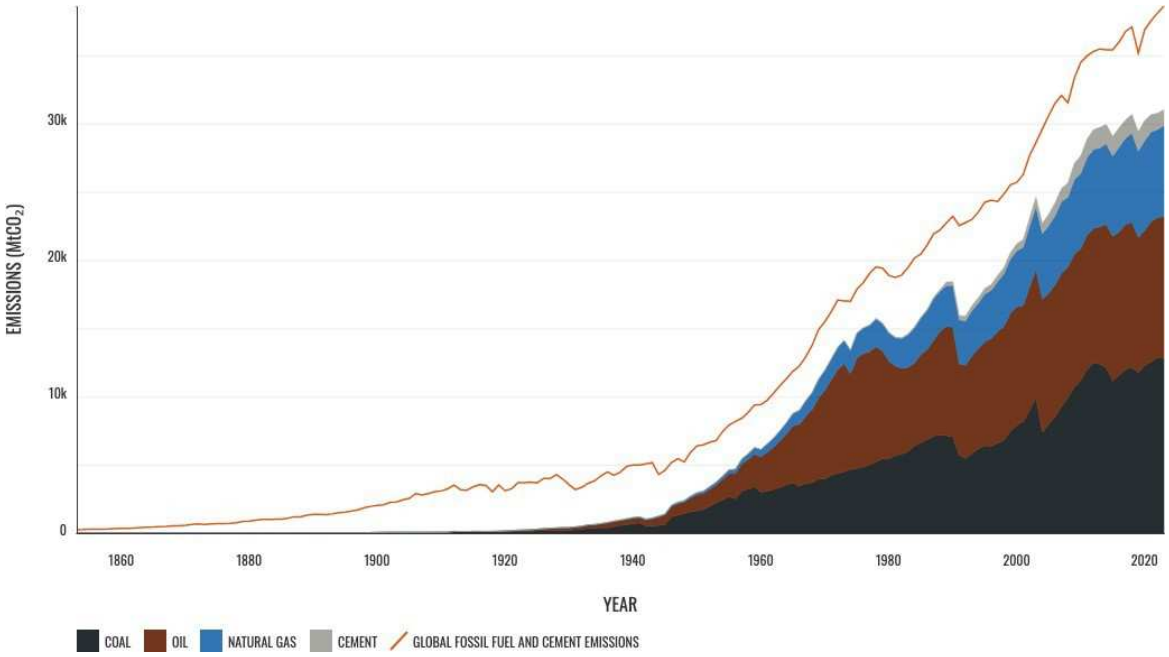
fornecem esse total, totalizando 1.812 $GtCO_2$ de 1750 a 2024. Os números de emissões de CO2 obtidos a partir dos cálculos acima (excluindo emissões equivalentes ao metano fugitivo$_{CO-2}$) são comparados a esse total para calcular as contribuições relativas das entidades para as emissões totais de combustíveis fósseis e cimento.

Descobertas

Esta seção apresenta uma análise do banco de dados da Carbon Majors, começando pelas emissões em 2024 e uma visão geral histórica dos dados. Em seguida, explora as emissões por tipo de entidade, examina a concentração contínua de emissões entre os principais produtores, analisa as emissões por região e conclui com uma visão geral do engajamento em políticas climáticas das maiores empresas do banco de dados.

A figura a seguir mostra as emissões anuais de CO2 atribuídas aos combustíveis de carbono e cimento produzidos pelas entidades da Carbon Majors desde o início dos registros de dados em 1854 até 2024, comparando-as com as emissões globais de CO2 de combustíveis fósseis e cimento.

Figura 3: Carbon Majors e Emissões Globais de CO2 (1854–2024)



Emissões em 2024

Em 2024, a Carbon Majors rastreou emissões totalizando 34,7 $GtCO_{2e}$ para as 166 entidades ativas no banco de dados, um aumento de 0,8% em comparação com 2023. As emissões de CO2 acompanhadas representam 80% das emissões globais de combustíveis fósseis e cimento de CO2 em 2024. Mais da metade dessas emissões globais pode ser atribuída a apenas 32 empresas estatais e de investidores,

destacando a concentração de emissões entre os maiores emissores corporativos.

A tabela abaixo destaca as 20 maiores entidades emissoras de carbono em 2024. Juntos, foram responsáveis por 18 $GtCO_2e$, representando 41,8% das emissões globais de CO_2 de combustíveis fósseis e cimento em 2024. A lista é amplamente dominada por entidades estatais, que representam 16 das 20 maiores. De fato,

8 das maiores 20 entidades são chinesas. Os Produtores de carvão são particularmente proeminentes com sete representados, seis da China e um da Índia, ressaltando a contínua dependência da Ásia do carvão.

Tabela 1: As 20 principais entidades da Carbon Majors por emissões (2024)

Entidade	Emissões totais ($MtCO_{2e}$)	Emissões de CO2 ($MtCO_2$)	Porcentagem das emissões globais de CO2
Saudi Aramco	1,786	1,653	4.28%
Coal India	1,684	1,513	3.92%
CHN Energy	1,679	1,509	3.91%
Companhia Nacional de Petróleo do Irã	1,387	1,208	3.13%
Gazprom	1,293	1,065	2.76%
Grupo Jinneng	1,129	1,014	2.63%
China (Cimento)	950	950	2.46%
Rosneft	763	690	1.79%
CNPC	750	655	1.70%
Shandong Energy	750	674	1.74%
Grupo Nacional de Carvão da China	732	657	1.70%
Grupo da Indústria de Carvão e Química de Shaanxi	694	624	1.62%
ExxonMobil	677	610	1.58%
Companhia Nacional de Petróleo de Abu Dhabi (ADNOC)	622	564	1.46%
Chevron	577	512	1.33%
Sonatrach	576	488	1.26%
Companhia Nacional de Petróleo do Iraque	549	518	1.34%
Grupo de Carvão Coque de Shanxi	540	486	1.26%
QatarEnergy	446	369	0.96%
Shell	426	373	0.97%

Nota: Os valores totais de emissões na tabela acima incluem as emissões fugitivas de metano em unidades equivalentes ao Mt CO_2*; no entanto, apenas os valores totais* de CO2 *são considerados no cálculo do percentual de uma entidade nas emissões totais de combustíveis fósseis e cimento.*

Emissões Históricas

A Carbon Majors registra 1.436 $GtCO_2e$ de emissões históricas acumuladas de 1854 até 2024 para 178 produtores industriais. A parcela de CO2 desse total equivale a 70% das emissões globais de combustíveis fósseis e cimento de CO2 desde o início da Revolução Industrial em 1750. Mais de um terço dessas emissões globais de CO2 historicamente pode ser atribuído a apenas 22 empresas.

A tabela abaixo mostra as 20 maiores entidades produtoras de carbono no banco de dados, que

coletivamente representam 872 $GtCO_2e$, representando 42,5% das emissões históricas globais de CO2 de combustíveis fósseis e cimento desde 1824. As entidades nas posições 1 a 11 permanecem inalteradas em relação ao ano passado. Mudanças significativas no top 20 incluem:

- A Core Natural Resources entrou no top 20 na 18ª posição, substituindo a Peabody Energy, que caiu para a 21ª posição. A Core Natural Resources é uma empresa recém-criada pela fusão de 2025 da CONSOL Energy e da Arch Resources.
- As entidades que subiram mais de uma posição no ranking incluem: CHN Energy, que subiu duas posições, e a produção de carvão polonesa (1913-2001) e a Abu Dhabi National Oil Company (ADNOC), que caíram duas posições cada.

Tabela 2: Principais 20 Entidades da Carbon Majors por Emissões (1854–2024)

Entidade	Emissões totais ($MtCO_{2e}$)	Emissões de CO2 ($MtCO_2$)	Porcentagem das emissões globais de CO2
Ex-União Soviética (1900–1991)	135,113	120,875	6.54%
China (Carvão, 1945–2004)	104,888	94,242	5.10%
Saudi Aramco	72,457	67,708	3.66%
Chevron	62,503	56,915	3.08%
ExxonMobil	57,458	51,653	2.79%
Gazprom	53,116	43,034	2.33%
Companhia Nacional de Petróleo do Irã	45,826	41,645	2.25%
BP	43,231	39,397	2.13%
Shell	41,517	37,267	2.02%
Coal India	35,221	31,646	1.71%
Pemex	26,458	24,180	1.31%
CHN Energy	25,231	22,670	1.23%
China (Cimento)	25,111	25,111	1.36%
ConocoPhillips	24,713	21,944	1.19%
Polônia (Carvão, 1913–2001)	22,695	20,392	1.10%
CNPC	20,434	18,491	1.00%
Corporação Britânica de Carvão (1947–1994)	19,745	17,741	0.96%
Recursos Naturais Centrais	19,189	17,229	0.93%
TotaisEnergias	18,572	16,819	0.91%
Companhia Nacional de Petróleo de Abu Dhabi (ADNOC)	18,480	16,925	0.92%

Nota: Os valores totais de emissões na tabela acima incluem as emissões fugitivas de metano em unidades equivalentes ao Mt CO_2*; no entanto, apenas os valores totais* de CO2 *são considerados no cálculo da porcentagem de uma entidade nas emissões totais de combustíveis fósseis e cimento.*

Emissões por Tipo de Entidade

As emissões das entidades avaliadas são atribuídas a três tipos de produtores: empresas de propriedade privada, empresas estatais e produtores estatais. Produtores de estados-nação são incluídos

principalmente no setor de carvão, e somente quando empresas de propriedade privada ou estatais não estão estabelecidas, desempenham um papel menor no país ou não possuem dados históricos suficientes de produção.

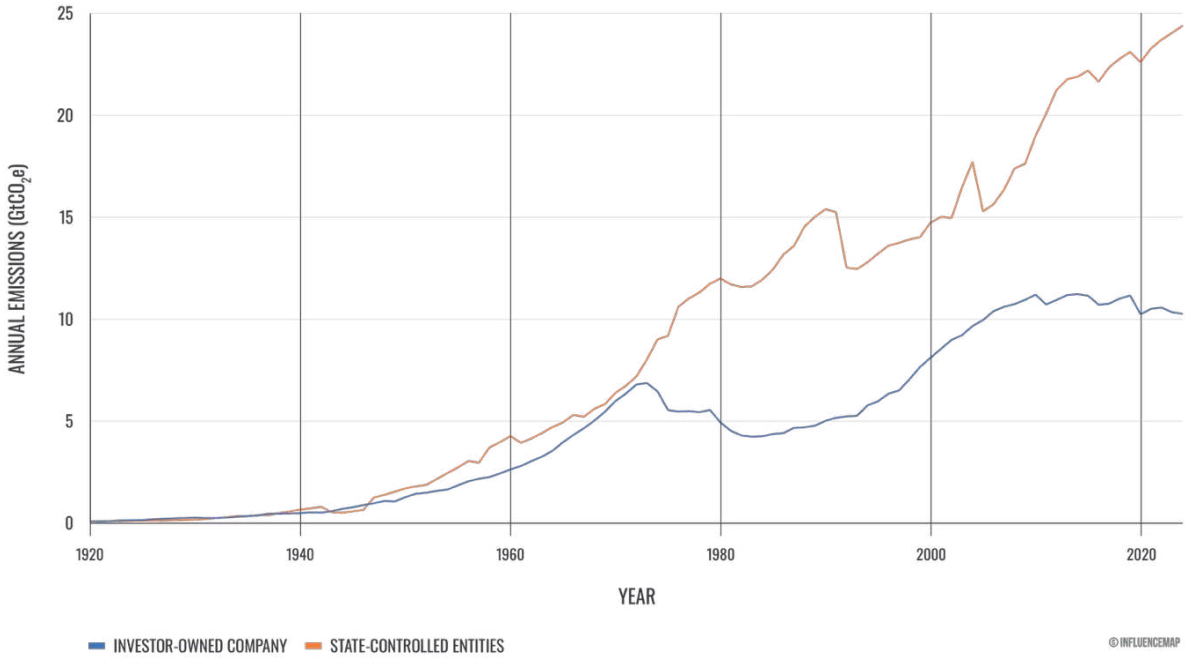
Das 178 entidades avaliadas, 100 são de propriedade privada, 72 são estatais e 6 são produtoras de estados-nação. Empresas estatais são as maiores contribuidoras para as emissões acumuladas, apesar do maior número de empresas de propriedade privada. Historicamente, as empresas estatais avaliadas respondem por 31,0% das emissões globais de CO2 fóssil, as empresas privadas por 24,1% e as produtoras estatais por 14,8%.

Em 2024, esse padrão é ainda mais acentuado. As 70 empresas estatais ativas estão ligadas a 53,4% das emissões globais de CO2 fóssil, em comparação com 94 empresas de capital investidor que representam 23,7% e 2 produtores estatais que representam 2,6%. Essa distribuição reflete o crescente domínio dos produtores estatais nos principais setores de combustíveis fósseis. Comparando as emissões de 2024 com as de 2023, a maioria das empresas estatais aumentou suas emissões, com 38 aumentando e 29 diminuindo. Em contraste, entre as empresas de propriedade privada, mais entidades reduziram as emissões, com 54 diminuindo e 39 aumentando.

As 5 maiores empresas de propriedade privada, ExxonMobil, Chevron, Shell, BP e ConocoPhillips, são responsáveis por uma parcela significativa das emissões globais em 2024, com um total de 2,4 $GtCO_{2e}$ (5,5% das emissões globais de CO2 fóssil). No entanto, isso ainda é consideravelmente menor do que o 7,8 $GtCO_{2e}$ (18,0% das emissões globais de CO2 fóssil) vinculado às 5 maiores entidades estatais em 2024: Saudi Aramco, Coal India, CHN Energy, National Iranian Oil Co. e Gazprom.

Até cerca de 2011, as empresas de propriedade privada eram o maior grupo individual em termos de emissões acumuladas. Desde então, as empresas estatais superaram as empresas de propriedade privada. No entanto, como mostrado no gráfico abaixo, combinar empresas estatais e produtores estatais para avaliar toda a produção controlada pelo Estado mostra que essas entidades consistentemente representaram mais emissões do que empresas de propriedade privada desde a década de 1950. Enquanto as emissões de empresas de propriedade privada caíram nos anos 1970 durante a crise do petróleo e só se recuperaram nos anos 1990, as emissões controladas pelo estado apresentaram crescimento constante ao longo das décadas.

Figura 4: Emissões por Tipo de Entidade (1920–2024)

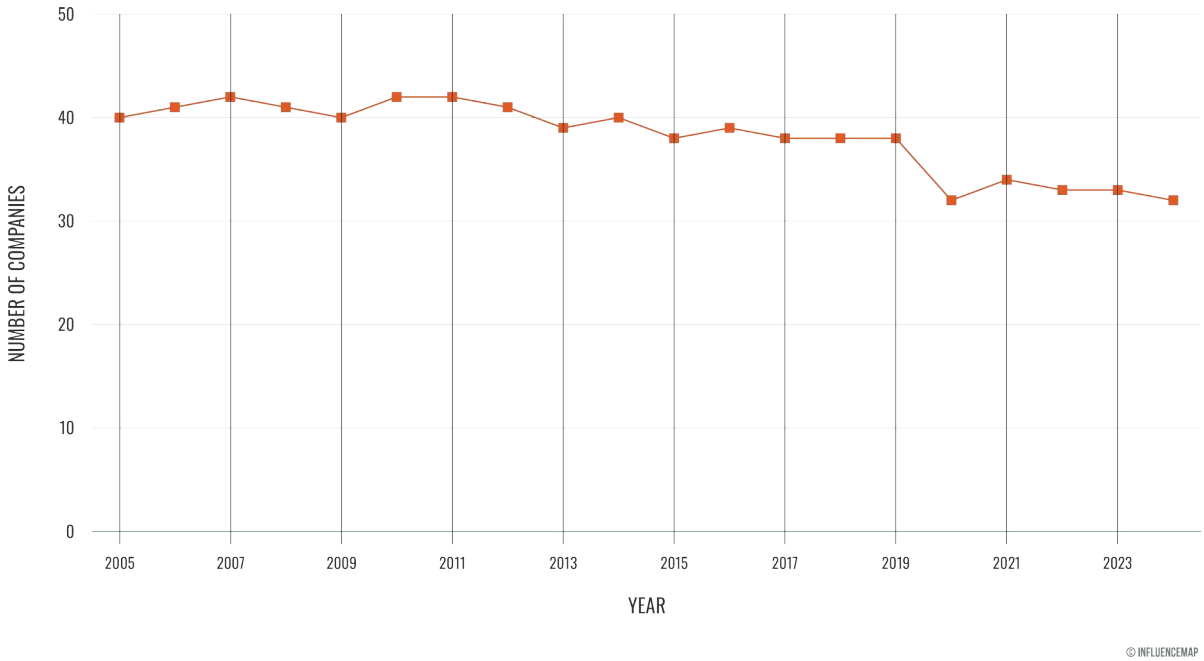


A queda nas emissões controladas pelo Estado após 1991 reflete a desagregação dos dados de produção da União Soviética em registros individuais das empresas na metodologia da Carbon Majors, combinada com dados incompletos em nível de empresa e uma queda real na produção durante a transição da URSS para a Rússia. Da mesma forma, o pico entre 2002 e 2005 é impulsionado pelo rápido aumento da produção da China em 2003–2004, seguido pela desagregação dos dados nacionais de produção de carvão no banco de dados da Carbon Majors em empresas chinesas individuais, cujos dados históricos iniciais não capturam totalmente a produção total de carvão chinesa.

Concentração de Emissões

Divulgações anteriores da Carbon Majors destacaram como a responsabilidade pelas emissões está altamente concentrada em um pequeno número de produtores corporativos. Historicamente, isso é claro: mais da metade das emissões globais de CO_2 de 1750 a 2024 podem ser atribuídas a apenas 81 empresas. A Figura 4 abaixo ilustra como essa concentração se intensificou ao longo do tempo. Em 2024, mais da metade das emissões fósseis de CO_2 pode ser rastreada a apenas 32 empresas estatais e de capital investidor, uma queda em relação às 38 empresas cinco anos antes e consistentemente acima de 40 entre 2005 e 2013. A grande queda em 2020 reflete a forte queda nas emissões globais durante a pandemia de COVID-19. Embora as emissões totais das grandes empresas de carbono tenham caído ligeiramente naquele ano, a maior parte da redução veio de empresas menores, e não dos maiores emissores. De fato, as 32 empresas responsáveis por mais da metade das emissões globais em 2020 aumentaram coletivamente suas emissões em comparação com 2019. Produtores menores se recuperaram em 2021 para níveis aproximadamente pré-pandemia, enquanto os maiores emissores continuaram aumentando suas emissões.

Figura 5: Número de empresas vinculadas a 50% das emissões (2005–2024)



Desde 2005, os setores de petróleo, gás e carvão passaram por mudanças significativas, com (i) fusões e aquisições e (ii) crescimento da produção orgânica impulsionando uma maior concentração de emissões de carbono entre menos produtores.

Fusões e aquisições notáveis desde 2005 incluem:

- A fusão de 2007 entre Statoil e Norsk Hydro, formando a Equinor, a oitava maior empresa de petróleo e gás do mundo na época[4].
- A aquisição do BG Group pela Shell em 2015, por cerca de 70 bilhões de dólares, foi o maior acordo de petróleo e gás desde a aquisição da Mobil pela Exxon em 1998.
- A aquisição da Anadarko Petroleum pela Occidental Petroleum em 2019, a maior fusão de petróleo e gás dos EUA desde que a Exxon adquiriu a Mobil.
- O anúncio da Chevron em 2023 sobre a aquisição da Hess Corporation consolidou a empresa como a segunda maior produtora corporativa historicamente.
- O anúncio da ExxonMobil em 2023 sobre a aquisição da Pioneer Natural Resources, reforçando sua posição como o terceiro maior produtor corporativo historicamente.
- Aquisição da Marathon Oil pela ConocoPhillips em 2024, formando juntos a 11ª maior produtora corporativa da história.
- A formação da Core Natural Resources agora ocupa a 14ª posição histórica em 2025, como resultado da fusão entre a CONSOL Energy (anteriormente 30ª) e a Arch Resources (anteriormente

[44] https://statfjord.industriminne.no/en/2019/11/26/merger-creates-statoilhydro/

42ª)

A análise das tendências anuais em 2024 mostra um desempenho misto entre as empresas. No total, 83 empresas reduziram as emissões, enquanto 77 as aumentaram, e 4 mantiveram o nível de emissões. No entanto, as maiores empresas geralmente impulsionaram a tendência de alta: quase dois terços das 32 empresas responsáveis por mais da metade das emissões globais em 2024 aumentaram as emissões em comparação a 2023. Apenas 28% da metade inferior das entidades ranqueadas tiveram aumentos, em comparação com 66% da metade superior, destacando que o crescimento das emissões está concentrado entre os maiores produtores. Esse padrão de concentração reflete tanto o crescimento da produção impulsionado por fusões quanto o orgânico. Sob a metodologia Carbon Majors, a produção histórica das empresas adquiridas é totalmente atribuída à empresa adquirente, o que significa que fusões e aquisições consolidam emissões passadas em entidades maiores. No entanto, o aumento contínuo das emissões entre os maiores produtores também aponta para uma expansão orgânica substancial de sua própria capacidade produtiva. No geral, a persistência do crescimento no topo do ranking sugere que o aumento da concentração é impulsionado não apenas pela consolidação corporativa, mas também pelo crescimento sustentado da produção entre as próprias maiores empresas e, em alguns casos, pela aquisição de produtores já em rápida expansão.

Emissões Regionais

Esta seção analisa as emissões tanto de empresas de propriedade privada quanto de empresas estatais por região, categorizando essas entidades com base na localização de suas sedes: África, Ásia, Austrália, Europa, Oriente Médio, América do Norte e América do Sul.

Os dados destacam claras disparidades regionais entre os principais produtores de combustíveis fósseis e cimento. Todas as regiões aumentaram as emissões de 2023 a 2024, mas as empresas asiáticas se destacam de forma esmagadora, contribuindo com 31,9% das emissões globais de CO2 fóssil em 2024, com mais de 81% vindo do carvão. O aumento de 2,2% é significativo, dado seu enorme nível de base e o fato de que mais da metade das grandes empresas asiáticas (58%) aumentou suas emissões em 2024 em comparação com 2023. As 31 empresas chinesas, sozinhas, representam 22,8% do total global, enquanto as seis empresas da Índia foram responsáveis por 5,2%, deixando as 13 empresas asiáticas restantes responsáveis por 3,8%.

Empresas europeias e norte-americanas, embora responsáveis por participações menores (15,2% e 11,2%, respectivamente), também registraram aumentos notáveis nas emissões proporcionais de 3,1% e 2,3%. No entanto, a maioria das empresas de ambas as regiões diminuiu as emissões, o que novamente implica um aumento da concentração de emissões entre os maiores produtores dessas regiões. O Oriente Médio é notável por diferentes razões: enquanto as empresas da região representam 12,9% das emissões globais — uma participação comparável à da Europa e América do Norte — elas estão ligadas a apenas 10 empresas, em comparação com 50 na Europa e 37 na América do Norte.

Regiões de menor emissão apresentam suas próprias preocupações. Empresas africanas e sul-americanas contribuem cada uma com menos de 4% para as emissões globais, mas a África registrou o maior aumento proporcional de 4,8%, enquanto na América do Sul, apenas uma das cinco empresas avaliadas não aumentou as emissões.

Tabela 3: Emissões Regionais em 2024

Região	Emissões totais de 2024 ($MtCO_{2e}$)	Porcentagem de Emissões globais de CO2	Empresas com emissões aumentadas	Mudança nas emissões a partir de 2023
África	1,675	3.8%	3 de 8 (38%)	+4.8%
Ásia	13,775	31.9%	29 de 50 (58%)	+2.2%
Austrália	274	0.6%	2 de 4 (50%)	+1.5%
Europa	6,682	15.2%	20 de 50 (40%)	+3.1%
Oriente Médio	5,537	12.9%	6 de 10 (60%)	+3.0%
América do Norte	4,856	11.2%	17 de 37 (46%)	+2.3%
América do Sul	847	2.0%	4 de 5 (80%)	+1.4%

Engajamento em Políticas

Muitas das empresas monitoradas pela Carbon Majors estão entre as mais opositoras à regulação climática globalmente, como mostra o banco de dados *LobbyMap da* InfluenceMap. O banco de dados LobbyMap avalia e classifica mais de 1000 empresas e 330 associações industriais por suas atividades que influenciam políticas de mudança climática, utilizando uma escala de A+ a F.

Empresas de propriedade privada

Como mostrado na tabela abaixo, o LobbyMap avalia 9 das 10 maiores empresas privada com maior emissão pela Carbon Majors. Dessas 9 empresas, 5 têm nota D ou menos, indicando posições pouco favoráveis à política climática. Os 4 restantes têm apenas um pouco mais de nota em C ou C-. 8 das 9 empresas avaliadas têm uma pontuação de intensidade de engajamento acima de 24%, indicando engajamento ativo com a política climática. Por exemplo, *a Chevron «* obtém um D- com intensidade de engajamento de 33%, e *a ExxonMobil* nota D com intensidade de engajamento de 39%, indicando que ambas as empresas estão altamente engajadas e mantêm posições não favoráveis ou opositoras em políticas relacionadas ao clima.

Tabela 4: Top 10 Empresas de Privadas: Pontuações de Engajamento de Políticas do LobbyMap

Empresa de propriedade de investidores engajamento	Banda de apresentação	Intensidade do
Chevron	D-	33%
ExxonMobil	D	39%
BP	C-	52%
Shell	C-	54%
ConocoPhillips	E+	26%
Recursos Naturais Centrais	-	-
TotalEnergies	C-	38%
Peabody Energy	F	6%
Occidental Petroleum	D-	24%
BHP	C	33%

Empresas estatais

Empresas estatais são ainda mais opositoras à regulação climática globalmente, segundo *pesquisa da LobbyMap*. O LobbyMap avalia 7 das 10 empresas estatais Carbon Majors com maior emissão. Semelhante às empresas de propriedade de investidores, nenhuma obtém pontuações acima de C-, enquanto 5 recebem pontuações menores ou iguais a D, enquanto de D a F indicam um engajamento cada vez mais obstrutivo em políticas climáticas.

Empresas estatais também não atuam de forma tão transparente quanto as empresas de propriedade privadas. As 6 empresas estatais avaliadas apresentam em média uma intensidade de engajamento de 13%, em comparação com 34% para empresas de propriedade privadas. *O* escore D da Saudi Aramco, com intensidade de engajamento de 10%, é representativo dessas empresas, indicando posições de oposição em política climática com engajamento ativo.

CarbonMajors

Tabela 5: 10 Principais Empresas Estatais: Pontuações de Engajamento de Políticas do LobbyMap

Empresa estatal	Banda de apresentação	Intensidade do engajamento
Saudi Aramco	D-	10%
Gazprom	E	9%
Companhia Nacional de Petróleo do Irã	-	-
Coal India	D	9%
Pemex	D-	16%
Energia CHN (Energia Shenhua)	C-	12%
CNPC (PetroChina)	C-	25%
British Coal Corporation	-	-
Companhia Nacional de Petróleo de Abu Dhabi (ADNOC)	D	12%
Petróleos da Venezuela	-	-

CarbonMajors

Conclusão

Essa análise destaca a responsabilidade concentrada pelas emissões globais de carbono e ressalta o papel fundamental da responsabilização corporativa no combate às mudanças climáticas. Historicamente, 70% das emissões globais de CO_2 de combustíveis fósseis e cimento de 1854 até 2024 podem ser atribuídas a 178 entidades produtoras, com mais de um terço atribuído a apenas 22 empresas. Isso demonstra uma clara concentração de responsabilidade entre um número relativamente pequeno de produtores. Nos últimos anos, a importância da responsabilidade corporativa aumentou, especialmente à medida que os compromissos climáticos internacionais foram implementados de forma desigual e, em algumas regiões, parcialmente revertidos. A Carbon Majors fornece uma base fundamental para atribuição científica e responsabilidade climática, vinculando emissões diretamente a empresas individuais e apoiando esforços para responsabilizá-las por danos ambientais e sociais.

Em 2024, o banco de dados rastreou 34,7 $GtCO_2e$ de emissões para 166 entidades ativas, um aumento de 0,8% em relação a 2023. Apenas 32 empresas, tanto estatais quanto de investidores, foram responsáveis por mais da metade das emissões globais de combustíveis fósseis e cimento, uma queda em relação às 38 empresas cinco anos antes e consistentemente acima de 40 entre 2005 e 2013, refletindo uma concentração crescente de emissões entre os maiores produtores. Empresas estatais agora dominam, respondendo por 53,4% das emissões globais de CO_2 fóssil em 2024, em comparação com 23,7% para empresas de capital privado, e compreendendo 16 dos 20 maiores emissores.
A maioria das empresas estatais aumentou suas emissões a partir de 2023, enquanto uma proporção maior de empresas de capital privado reduziu as suas, destacando a mudança estrutural na produção global de combustíveis fósseis em direção à propriedade estatal.

A concentração de emissões em um pequeno número de empresas tem implicações diretas para a responsabilidade climática. Assim como em anos anteriores, os maiores produtores continuam impulsionando o crescimento das emissões: apenas 28% da metade inferior das entidades ranqueadas tiveram aumentos, em comparação com 66% da metade superior. Esse padrão de concentração é impulsionado tanto por fusões quanto pelo crescimento da produção orgânica, indicando que o aumento da concentração é impulsionado não apenas pela consolidação corporativa, mas também pelo crescimento sustentado da produção entre as maiores empresas. Essa crescente concentração reforça o argumento para intervenções jurídicas e políticas direcionadas, já que um número limitado de empresas é responsável por uma parcela desproporcional das emissões globais.

Em resumo, o banco de dados Carbon Majors oferece uma visão abrangente tanto das emissões históricas quanto contemporâneas, revelando como um pequeno número de empresas molda os totais globais de carbono. Ao tornar a responsabilidade corporativa mensurável, apoia esforços legais, políticos e científicos para mitigar as mudanças climáticas e ressalta a necessidade urgente de intervenções direcionadas e reformas sistêmicas para alinhar a produção industrial aos objetivos climáticos globais e limitar o aquecimento futuro.

CarbonMajors

Apêndice 1: Emissões de 2024

A coluna de emissões na tabela abaixo inclui quatro tipos de emissões operacionais diretamente ligadas à produção (comportando parte das emissões do Escopo 1) e emissões da combustão de produtos comercializados (categorizadas como Escopo 3 Categoria 11: Uso de Produtos Vendidos). Um dos quatro tipos de emissão direta é o metano fugitivo (veja a Metodologia para mais informações), apresentado em unidades equivalentes de CO2. Na coluna final, *Percentual das emissões globais de CO2*, o valor do metano fugitivo não é considerado ao comparar as emissões totais de CO2 de uma entidade com as emissões totais de CO2 de combustíveis fósseis e cimento.

Entidades Principais do Carbono Classificadas por Emissões (2024)

	Entidade	Emissões totais ($MtCO_{2e}$)	Porcentagem das emissões globais de CO2
1	Saudi Aramco	1,786	4.28%
2	Coal India	1,684	3.92%
3	CHN Energy	1,679	3.91%
4	Companhia Nacional de Petróleo do Irã	1,387	3.13%
5	Gazprom	1,293	2.76%
6	Grupo Jinneng	1,129	2.63%
7	China (Cimento)	950	2.46%
8	Rosneft	763	1.79%
9	CNPC	750	1.70%
10	Shandong Energy	750	1.74%
11	Grupo Nacional de Carvão da China	732	1.70%
12	Grupo da Indústria de Carvão e Química de Shaanxi	694	1.62%
13	ExxonMobil	677	1.58%
14	Companhia Nacional de Petróleo de Abu Dhabi	622	1.46%
15	Chevron	577	1.33%
16	Sonatrach	576	1.26%
17	Companhia Nacional de Petróleo do Iraque	549	1.34%
18	Grupo de Carvão Coque de Shanxi	540	1.26%
19	QatarEnergy	446	0.96%
20	Shell	426	0.97%
21	Kuwait Petroleum Corp.	419	1.01%
22	Petrobras	400	0.95%
23	Pemex	378	0.88%
24	BP	354	0.80%
25	ConocoPhillips	352	0.82%
26	TotaisEnergias	352	0.81%
27	Corporação Nacional de Petróleo da Nigéria.	337	0.78%
28	Glencore	332	0.77%

CarbonMajors

	Entidade	Emissões totais ($MtCO_{2e}$)	Porcentagem das emissões globais de CO2
29	Lukoil	323	0.76%
30	China Huaneng Group	300	0.70%
31	Equinor	296	0.67%
32	CNOOC	293	0.69%
33	Peabody Energy	261	0.61%
34	Petronas	260	0.57%
35	Grupo Químico Luan	259	0.60%
36	Novatek	257	0.55%
37	SUEK	256	0.60%
38	Eni	243	0.55%
39	TurkmenGaz	237	0.50%
40	Corporação Estatal de Investimento em Energia	219	0.51%
41	Sinopec	214	0.49%
42	Samruk-Kazyna	213	0.50%
43	Grupo de Holding da Indústria de Energia de Liaoning	209	0.49%
44	Occidental Petroleum	209	0.49%
45	Recursos Naturais Canadenses	204	0.48%
46	Energia Tianchi de Xinjiang	201	0.47%
47	Grupo de Energia e Indústria Química de Henan	198	0.46%
48	Petróleos da Venezuela	192	0.45%
49	Grupo de Holding de Energia Huaihe	190	0.44%
50	Expandir Energia	181	0.38%
51	Recursos Naturais Centrais	181	0.42%
52	Recursos Bumi	177	0.41%
53	Sonangol	174	0.42%
54	Surgutneftegas	173	0.42%
55	Grupo da Indústria do Carvão Huadiano	170	0.40%
56	Desenvolvimento de Petróleo em Omã	168	0.39%
57	EQT Corporation	162	0.34%
58	Recursos EOG	159	0.37%
59	Grupo Yitai da Mongólia Interior	158	0.37%
60	Petoro	158	0.35%
61	Recursos Energéticos Jizhong	157	0.37%
62	Pertamina	157	0.36%
63	Recursos AlamTri	153	0.36%
64	Corporação Nacional de Petróleo da Líbia.	150	0.36%
65	Grupo de Holding de Mineração Longmay de Heilongjiang	139	0.32%
66	Grupo Adani	139	0.33%
67	Mina de Mineração de Singareni	138	0.32%

CarbonMajors

	Entidade	Emissões totais ($MtCO_{2e}$)	Porcentagem das emissões globais de CO2
68	Recursos Seriti	134	0.31%
69	Mongólia Interior Dian Tou Energy	130	0.30%
70	Carvão e Eletricidade Huineng da Mongólia Interior	126	0.29%
71	Suncor Energy	120	0.30%
72	Cenovus Energy	119	0.28%
73	Kuzbassrazrezugol	118	0.27%
74	ONGC	115	0.26%
75	PTTEP	112	0.24%
76	General Petroleum Egípcia	112	0.25%
77	Grupo de Tecnologia de Novos Materiais de Huayang	112	0.26%
78	Devon Energy	110	0.26%
79	Banpu	110	0.25%
80	Ecopetrol	110	0.26%
81	NTPC	108	0.25%
82	Coterra Energy	105	0.23%
83	BHP	103	0.24%
84	Energia Diamondback	102	0.24%
85	Sasol	97	0.22%
86	Exxaro Resources Ltd	95	0.22%
87	Energias Bapco	95	0.21%
88	Mitsubishi Corporation	92	0.21%
89	Grupo Kailuan	91	0.21%
90	Óleo de turmalina	91	0.19%
91	INPEX	90	0.21%
92	Ovintiv	89	0.20%
93	Repsol	89	0.19%
94	Recursos Antero	88	0.19%
95	Grupo de Recursos Eurasiáticos	88	0.20%
96	Elgaugol	82	0.19%
97	Tatneft	82	0.20%
98	Parceiros de Recursos da Aliança	81	0.19%
99	Woodside Energy	79	0.17%
100	China Pingmei Shenma Holding Group	79	0.18%
101	YPF	75	0.17%
102	Recursos Naturais Consolidados Americanos	74	0.17%
103	Uzbekneftegaz	72	0.15%
104	Companhia de Energia de Transição Navajo	72	0.17%
105	PetroEcuador	70	0.17%
106	APA Corporation	68	0.16%

CarbonMajors

	Entidade	Emissões totais ($MtCO_{2e}$)	Porcentagem das emissões globais de CO2
107	Recursos Continentais	65	0.15%
108	Grupo Sibantracite	62	0.14%
109	Coreia do Norte	61	0.14%
110	RWE	59	0.14%
111	Carvão de Whitehaven	57	0.13%
112	Grupo Mengtai da Mongólia Interior	57	0.13%
113	Mubadala	56	0.13%
114	Grupo de Mineração Huaibei	56	0.13%
115	Grupo da Indústria do Carvão de Huating	55	0.13%
116	EVRAZ	55	0.13%
117	Grupo de Recursos Yidong da Mongólia Interior	54	0.13%
118	Recursos do ARC	54	0.12%
119	Cimento UltraTech	53	0.14%
120	Grupo PGE	52	0.12%
121	OMV	51	0.12%
122	Grupo de Mineração de Xuzhou	50	0.12%
123	DTEK	50	0.11%
124	Anglo-americano	47	0.11%
125	Polska Grupa Gornicza (PGG)	46	0.11%
126	Grupo Holcim	46	0.12%
127	Stroyservis	42	0.10%
128	Grupo de Energia de Carvão Panjiang de Guizhou	42	0.10%
129	Recursos Alfa Metalúrgicos	42	0.10%
130	Grupo En+	41	0.10%
131	Materiais de Heidelberg	40	0.10%
132	Recursos CNX	40	0.08%
133	Recursos Teck	37	0.09%
134	Naftogaz	36	0.07%
135	Santos	34	0.07%
136	BASF	34	0.07%
137	JSW	34	0.08%
138	Orlen	32	0.07%
139	NACCO Indústrias	31	0.07%
140	Carvão SDS	30	0.07%
141	Murphy Oil	28	0.06%
142	Mechel	28	0.07%
143	SM Energy	28	0.06%
144	Severstal	25	0.06%
145	Novaya Gornaya	24	0.06%

CarbonMajors

	Entidade	Emissões totais ($MtCO_{2e}$)	Porcentagem das emissões globais de CO2
146	Carvão Russo	24	0.06%
147	LW Bogdanka	21	0.05%
148	Grupo de Holding Kazakhmys	20	0.05%
149	TALTEK	20	0.05%
150	Doly severoceske	19	0.04%
151	Cemex	17	0.04%
152	CRH	15	0.04%
153	Combustível Wolverine	15	0.04%
154	Kuzbasskaya Toplivnaya	14	0.03%
155	Poludniowy Koncern Weglowy	13	0.03%
156	Metinvest	13	0.03%
157	Cimento Taiheiyo	12	0.03%
158	Mineração Westmoreland	12	0.03%
159	Grupo de Mineração Kiewit	12	0.03%
160	Vistra	11	0.03%
161	Petróleo Sírio	10	0.02%
162	Grupo Sev.en	9	0.02%
163	Tullow Oil	9	0.02%
164	Energia Obsidiana	6	0.01%
165	OKD	6	0.01%
166	Sokolovska uhelna	3	0.01%

CarbonMajors

Apêndice 2: Emissões Históricas (1854–2024)

A coluna de emissões na tabela abaixo inclui quatro tipos de emissões operacionais diretamente ligadas à produção (comportando parte das emissões do Escopo 1) e emissões da combustão de produtos comercializados (categorizadas como Escopo 3 Categoria 11: Uso de Produtos Vendidos). Um dos quatro tipos de emissão direta é o metano fugitivo (veja a Metodologia para mais informações), apresentado em unidades equivalentes de CO2. Na última coluna, *Percentagem das emissões globais de CO2*, o valor do metano fugitivo não é considerado ao comparar as emissões totais de CO2 de uma entidade com as emissões totais de combustíveis fósseis e CO2 de cimento.

Entidades Principais do Carbono Classificadas por Emissões (1854–2024)

	Entidade	Emissões ($MtCO_{2e}$)	Porcentagem das emissões globais de CO2
1	Ex-União Soviética	135,113	6.54%
2	China (Carvão)	104,888	5.10%
3	Saudi Aramco	72,457	3.66%
4	Chevron	62,503	3.08%
5	ExxonMobil	57,458	2.79%
6	Gazprom	53,116	2.33%
7	Companhia Nacional de Petróleo do Irã	45,826	2.25%
8	BP	43,231	2.13%
9	Shell	41,517	2.02%
10	Coal India	35,221	1.71%
11	Pemex	26,458	1.31%
12	CHN Energy	25,231	1.23%
13	China (Cimento)	25,111	1.36%
14	ConocoPhillips	24,713	1.19%
15	Polônia (Carvão, 1913 em 2001)	22,695	1.10%
16	CNPC	20,434	1.00%
17	Corporação Britânica de Carvão (1947-1994)	19,745	0.96%
18	Recursos Naturais Centrais	19,189	0.93%
19	TotaisEnergias	18,572	0.91%
20	Companhia Nacional de Petróleo de Abu Dhabi	18,480	0.92%
21	Peabody Energy	18,283	0.89%
22	Petróleos da Venezuela	17,265	0.86%
23	Kuwait Petroleum Corp.	16,757	0.85%
24	Companhia Nacional de Petróleo do Iraque	16,390	0.84%
25	Rosneft	16,340	0.82%
26	Sonatrach	16,091	0.75%
27	Grupo Jinneng	14,493	0.70%
28	Occidental Petroleum	13,382	0.65%

CarbonMajors

	Entidade	Emissões ($MtCO_{2e}$)	Porcentagem das emissões globais de CO2
29	Petrobras	11,611	0.58%
30	Shandong Energy	11,291	0.55%
31	BHP	11,264	0.55%
32	Corporação Nacional de Petróleo da Nigéria.	10,768	0.54%
33	Grupo Nacional de Carvão da China	9,882	0.48%
34	Eni	9,686	0.46%
35	Tchecoslováquia (Carvão, 1938-1992)	9,618	0.47%
36	QatarEnergy	9,348	0.44%
37	Petronas	9,260	0.43%
38	Pertamina	8,582	0.42%
39	Lukoil	8,491	0.43%
40	Corporação Nacional de Petróleo da Líbia.	8,430	0.43%
41	Equinor	8,332	0.40%
42	Anglo-americano	8,260	0.40%
43	RWE	7,708	0.37%
44	Grupo de Carvão Coque de Shanxi	7,556	0.37%
45	Grupo da Indústria de Carvão e Química de Shaanxi	7,414	0.36%
46	Glencore	6,974	0.34%
47	Rio Tinto (1959-2018)	6,767	0.33%
48	Recursos Alfa Metalúrgicos	6,215	0.30%
49	ONGC	6,150	0.30%
50	SUEK	5,331	0.26%
51	Sasol	5,187	0.25%
52	Surgutneftegas	5,090	0.26%
53	TurkmenGaz	4,820	0.21%
54	Repsol	4,766	0.23%
55	Desenvolvimento de Petróleo em Omã	4,726	0.23%
56	CNOOC	4,715	0.23%
57	Coreia do Norte	4,653	0.23%
58	General Petroleum Egípcia	4,559	0.22%
59	Petoro	4,479	0.21%
60	Grupo de Energia e Indústria Química de Henan	4,387	0.21%
61	Sinopec	4,373	0.22%
62	China Huaneng Group	4,368	0.21%
63	Samruk-Kazyna	4,315	0.21%
64	Grupo Químico Luan	4,178	0.20%
65	Corporação Estatal de Investimento em Energia	4,139	0.20%
66	Recursos Bumi	4,123	0.20%
67	Recursos Energéticos Jizhong	3,919	0.19%

CarbonMajors

	Entidade	Emissões ($MtCO_{2e}$)	Porcentagem das emissões globais de CO2
68	Sonangol	3,715	0.19%
69	Uzbekneftegaz	3,610	0.16%
70	Novatek	3,601	0.16%
71	Mina de Mineração de Singareni	3,569	0.17%
72	Devon Energy	3,536	0.16%
73	Grupo de Holding de Energia Huaihe	3,453	0.17%
74	Grupo de Tecnologia de Novos Materiais de Huayang	3,391	0.16%
75	Ecopetrol	3,314	0.17%
76	Suncor Energy	3,301	0.17%
77	Grupo Holcim	3,265	0.18%
78	Grupo de Holding da Indústria de Energia de Liaoning	3,177	0.15%
79	Ovintiv	3,175	0.15%
80	Recursos Naturais Canadenses	3,078	0.15%
81	Expandir Energia	3,046	0.13%
82	Ministério da Energia da Ucrânia (Carvão, 1992-	2,885	0.14%
83	Kuzbassrazrezugol	2,813	0.14%
84	Grupo Kailuan	2,632	0.13%
85	Polska Grupa Gornicza (PGG)	2,586	0.13%
86	Minerais AMAX de Chipre (1969-1998)	2,569	0.12%
87	Grupo de Holding de Mineração Longmay de Heilongjiang	2,562	0.12%
88	Grupo Yitai da Mongólia Interior	2,541	0.12%
89	Recursos Naturais Consolidados Americanos	2,437	0.12%
90	Mineração Westmoreland	2,404	0.12%
91	BASF	2,398	0.11%
92	Recursos AlamTri	2,357	0.11%
93	Exxaro Resources Ltd	2,345	0.11%
94	Energias Bapco	2,317	0.11%
95	Mongólia Interior Dian Tou Energy	2,227	0.11%
96	Cenovus Energy	2,210	0.11%
97	Mitsubishi Corporation	2,200	0.10%
98	APA Corporation	2,193	0.10%
99	YPF	2,186	0.10%
100	Banpu	2,158	0.10%
101	China Pingmei Shenma Holding Group	2,149	0.10%
102	Tatneft	2,144	0.11%
103	Grupo de Recursos Eurasiáticos	2,143	0.10%
104	Recursos EOG	2,113	0.10%
105	PetroEcuador	2,062	0.11%
106	Parceiros de Recursos da Aliança	1,945	0.09%

CarbonMajors

	Entidade	Emissões ($MtCO_{2e}$)	Porcentagem das emissões globais de CO2
107	Materiais de Heidelberg	1,764	0.10%
108	INPEX	1,736	0.08%
109	Grupo de Mineração Kiewit	1,723	0.08%
110	NACCO Indústrias	1,707	0.08%
111	Carvão e Eletricidade Huineng da Mongólia Interior	1,695	0.08%
112	Grupo da Indústria do Carvão Huadiano	1,694	0.08%
113	Petróleo Sírio	1,651	0.08%
114	Recursos Teck	1,591	0.08%
115	Grupo de Mineração Huaibei	1,533	0.07%
116	EVRAZ	1,486	0.07%
117	Pico das Nuvens (2009-2019)	1,476	0.07%
118	Grupo PGE	1,433	0.07%
119	DTEK	1,424	0.07%
120	Vistra	1,416	0.07%
121	Coterra Energy	1,393	0.06%
122	Mechel	1,380	0.07%
123	Naftogaz	1,322	0.06%
124	EQT Corporation	1,309	0.06%
125	PTTEP	1,294	0.06%
126	Grupo de Recursos Yidong da Mongólia Interior	1,276	0.06%
127	Grupo de Energia de Carvão Panjiang de Guizhou	1,234	0.06%
128	Grupo de Mineração de Xuzhou	1,175	0.06%
129	Grupo Mengtai da Mongólia Interior	1,151	0.06%
130	OMV	1,120	0.05%
131	Energia Diamondback	1,081	0.05%
132	Woodside Energy	1,074	0.05%
133	Grupo da Indústria do Carvão de Huating	994	0.05%
134	Santos	915	0.04%
135	Grupo En+	907	0.04%
136	Cemex	905	0.05%
137	Carvão SDS	901	0.04%
138	Carvão do Reino Unido (1995-2015)	882	0.04%
139	Óleo de turmalina	881	0.04%
140	JSW	853	0.04%
141	Murphy Oil	822	0.04%
142	Orlen	806	0.04%
143	Mubadala	791	0.04%
144	Recursos Antero	782	0.04%
145	Severstal	748	0.04%

CarbonMajors

	Entidade	Emissões ($MtCO_{2e}$)	Porcentagem das emissões globais de CO2
146	Novaya Gornaya	675	0.03%
147	Energia Tianchi de Xinjiang	649	0.03%
148	Metinvest	646	0.03%
149	Recursos do ARC	640	0.03%
150	Recursos Seriti	608	0.03%
151	Cimento Taiheiyo	605	0.03%
152	Carvão Russo	598	0.03%
153	Recursos Continentais	587	0.03%
154	Grupo Adani	576	0.03%
155	Companhia de Energia de Transição Navajo	572	0.03%
156	Grupo Sibantracite	541	0.03%
157	Grupo de Holding Kazakhmys	533	0.03%
158	Carvão de Whitehaven	522	0.03%
159	Cimento UltraTech	518	0.03%
160	Stroyservis	479	0.02%
161	Kuzbasskaya Toplivnaya	464	0.02%
162	Doly severoceske	462	0.02%
163	ArcelorMittal (2000-2023)	458	0.02%
164	LW Bogdanka	452	0.02%
165	Combustível Wolverine	413	0.02%
166	SM Energy	376	0.02%
167	Energia Obsidiana	366	0.02%
168	OKD	357	0.02%
169	NTPC	351	0.02%
170	Vale (2007-2022)	317	0.02%
171	Recursos CNX	307	0.01%
172	Elgaugol	284	0.01%
173	CRH	256	0.01%
174	Grupo Sev.en	253	0.01%
175	Poludniowy Koncern Weglowy	250	0.01%
176	Tullow Oil	229	0.01%
177	TALTEK	223	0.01%
178	Sokolovska uhelna	209	0.01%

POR TRADUÇÃO CONFORME:

Rio de Janeiro, 14 de agosto de 2026.

gov.br
Documento assinado digitalmente
ANELISE PACHECO
Data: 14/08/2026 07:47:52-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 1

npj | natural hazards

Article

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

Climate change and El Niño behind extreme precipitation leading to major floods in southern Brazil in 2024

Check for updates

Ben Clarke[1] ✉, Clair Barnes[1], Regina Rodrigues[2], Mariam Zachariah[1], Lincoln Muniz Alves[3], Rein Haarsma[4], Izidine Pinto[4], Wenchang Yang[5], Maja Vahlberg[6], Gabriel Vecchi[5], Karina Izquierdo[6], Joyce Kimutai[1], Sjoukje Philip[4], Sarah Kew[4], João Biehl[7], Miqueias Mugge[8] & Friederike E. L. Otto[1]

In April–May 2024, unprecedented floods in Rio Grande do Sul displaced around 600,000 people and caused more than 180 deaths. This study unpacks the role of anthropogenic climate change and the preceding El Niño conditions on the extreme rainfall using a probabilistic event attribution. This event was rare even in the 2024 climate, with a return period exceeding 100 years. With global warming of 1.2 °C, such an event has become approximately 2 (0.06–4200) times as likely, or equivalently 12% (−13 to +43%) more intense. The recent El Niño event also approximately doubled (0.7–37 times) the likelihood of such an event relative to a neutral year. In any disaster, the vulnerability and exposure context play a crucial role in turning the meteorological hazard into impacts, underscoring the need for equitable adaptation measures to break the cycle of risk and inequality in the context of a warming climate.

Between April 24th and May 4th, the southernmost state of Brazil, Rio Grande do Sul, experienced persistent and extraordinary precipitation, equivalent to three average months of rain in a two-week period, with an average accumulation of 420 mm. This record-breaking precipitation (Fig. 1) led to historically high river levels, putting 12 dams under pressure, and caused extensive flooding affecting 90% of the state's municipalities. Flooding occurred across much of the state but was particularly intense in the capital Porto Alegre, where this was the wettest start to May for 63 years[1]. These floods constitute one of the most significant humanitarian disasters experienced in Brazil. In total, 2.3 million individuals were affected[2], with 600,000 people displaced and more than 180 fatalities caused[3,4]. The violent floods caused losses, damages, and disruptions, impacting people from every demographic across Rio Grande do Sul's approximately 11 million inhabitants, including higher-income communities[5]. However, differential exposure, vulnerability, and coping capacity rendered certain groups disproportionately impacted.

The extreme precipitation observed across most of the state (Fig. 1) was driven by the persistent "South Atlantic high", a region of high pressure over eastern Brazil and the South Atlantic (Fig. 2). This intensified the trade winds, facilitating the flow of easterly moisture from the tropical Atlantic Ocean to the central region of Brazil, followed by enhanced moisture transport from central Brazil towards Rio Grande do Sul through the South American Lower-Level Jet (SALLJ). The air masses travelled along a continental route, having originated from the central region of Brazil several days earlier (Fig. 3a). The persistent high-pressure system that developed over the south Atlantic Ocean acted as a blocking system of the westerly flow. This resulted in high precipitation amounts that accumulated over a period of several days and led to unprecedented floods over Rio Grande do Sul (Figs. 1, 3b).

Precipitation trends and variability in Southern Brazil (comprising the states of Paraná, Santa Catarina, and Rio Grande do Sul) are influenced by a combination of the seasonal patterns (largely affecting the timing of precipitation), interannual climate phenomena such as the El Niño Southern Oscillation (ENSO)[6], decadal-scale variability and climate change. This region is characterised by a subtropical climate (transition between tropical and temperate climate) with a continuous supply of moisture from the Atlantic Ocean and the Amazon region[7]. Mesoscale convective systems are the most important rain-producing weather systems in this region mainly during spring/summer (from September to February), whereas cold fronts are responsible for precipitation during fall/winter (from March to August). For this reason, precipitation is distributed evenly throughout the year[8],

[1]Centre for Environmental Policy, Imperial College, London, UK. [2]Univ. Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brazil. [3]Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São Paulo, Brazil. [4]Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), De Bilt, The Netherlands. [5]Department of Geosciences, Princeton University, Princeton, NJ, USA. [6]Red Cross Red Crescent Climate Centre, The Hague, the Netherlands. [7]Department of Anthropology and Brazil LAB, Princeton University, Princeton, NJ, USA. [8]Brazil LAB, Princeton University, Princeton, NJ, USA. ✉e-mail: b.clarke@imperial.ac.uk

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 2

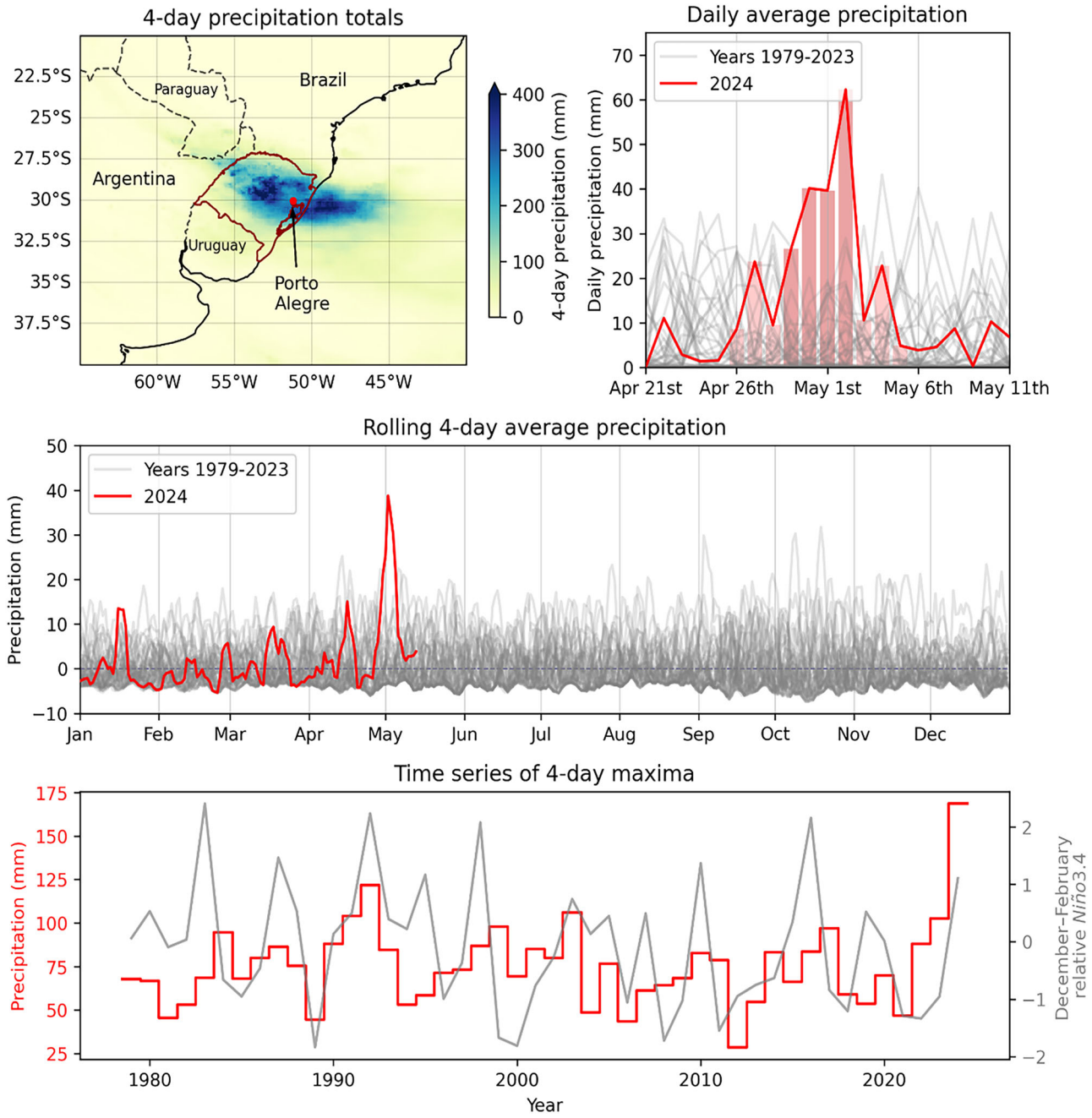


Fig. 1 | Accumulated precipitation over Rio Grande do Sul, the southernmost state of Brazil, in late April and early May 2024 (data from MSWEP). Top left: Map of accumulations over the wettest 4-day period. Rio Grande do Sul is highlighted in dark red. Top right: The daily precipitation averaged over Rio Grande do Sul in 2024 (red) and in all other years in the record (grey). The dark (light) red bars show the 4-day (10-day) window in which the precipitation was most intense. Middle: Anomalies of rolling 4-day accumulations of precipitation over Rio Grande do Sul in 2024 (red) versus the 1990-2020 climatology and against all other years from 1979 in the record (grey). Bottom: time series of maximum 4-day March-May precipitation over Rio Grande do Sul, and the relative December-February (DJF) Niño3.4 index (see Methods), with a value of 1.107 in DJF 2023/24.

making it the second rainiest region in the country, next only to the Amazon rainforest in Northwestern Brazil[9].

During late 2023 and early 2024, ENSO was in its strongly positive (El Niño) phase (Fig. 1). The subtropical South Atlantic high centre normally moves westward over central Brazil during fall/winter (eastward over the South Atlantic during spring/summer). However, during this event, the Pacific South America (PSA) wavetrain pattern related to El Niño amplified the high-pressure centre over central Brazil[10], making it larger and more persistent there. Typical of El Niño episodes, this causes anomalous subsidence in the region and weakens the South Atlantic Convergence Zone, a convective band in the austral summer characterised by intense convergence of warm, moist air extending from the Amazon Basin to the subtropical South Atlantic[11]. At the same time, the winds associated with the anomalous high-pressure centre enhance the SALLJ, a climatological northwesterly flow east of the Andes that transports moisture from tropical latitudes to southeast South America[12]. Moreover, during this event, the tropical Atlantic was anomalously warm, feeding more moisture to the SALLJ.

It is noteworthy that, even though the PSA pattern is strongest during spring and summer, heavy precipitation and floods can occur during fall and winter when the frontal systems start to come from higher latitudes and become stuck over the region, blocked by the persistent high-pressure centre over central Brazil. Thus, the most impactful floods in southern Brazil associated with El Niño tend to occur during fall and earlier winter, such as the floods of the Itajai Açu River in July 1983[13]. Indeed, another important contributing factor to the heavy rain in May 2024 was the proximity of the jet

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 3

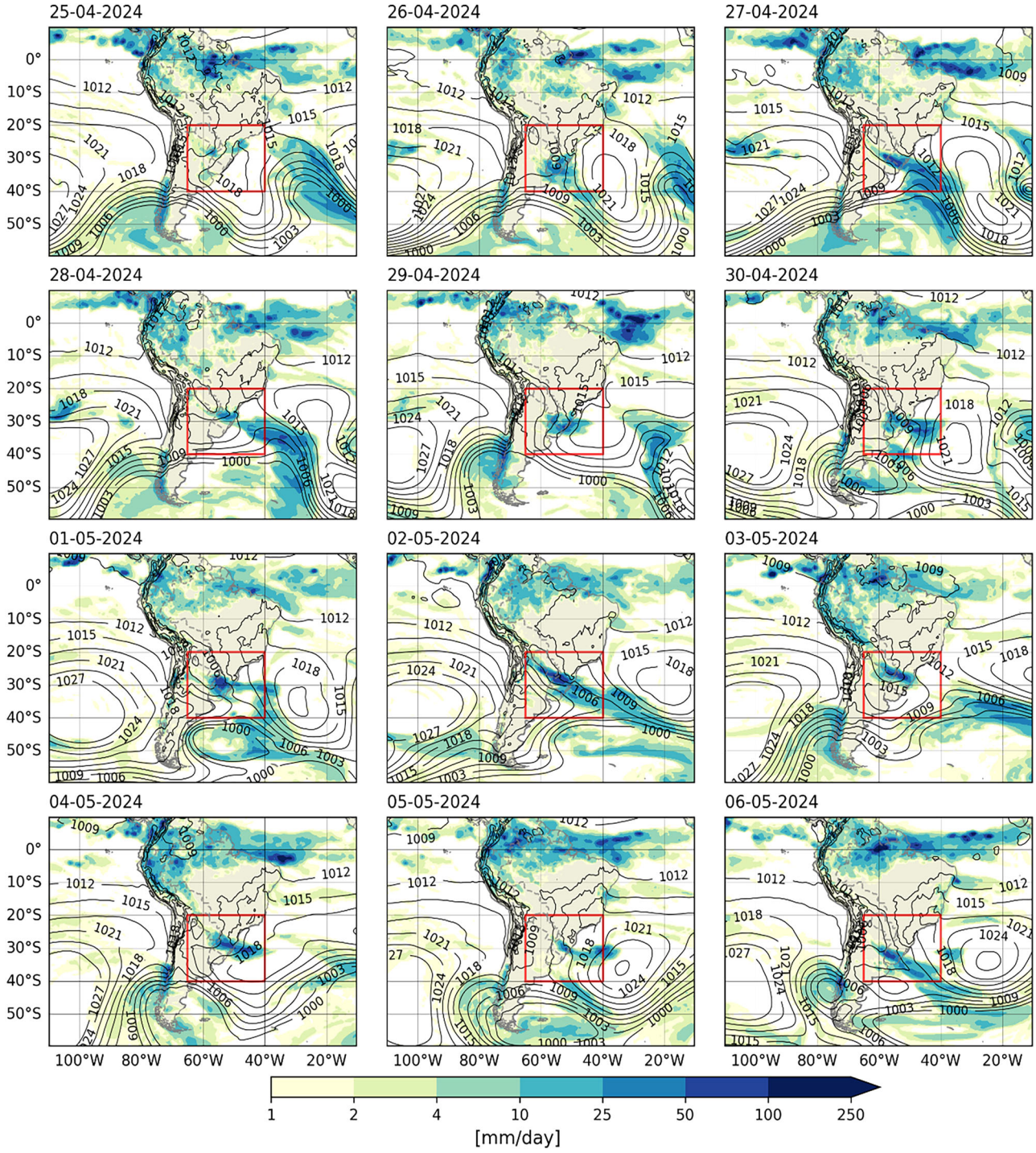


Fig. 2 | Daily precipitation and mean sea level pressure from 25 April to 6 May 2024. The red box shows the region shown in Fig. 1, panel 1. High pressure in the South Atlantic facilitates the transport of moisture into central Brazil, then southeast via the South American low-level jet to Rio Grande do Sul. Data from ERA5: while this precipitation data is not used in the study, the dataset is used here to understand the large-scale event dynamics.

stream bringing more instabilities (frontal systems). These fronts were then blocked by the high-pressure centre over central Brazil, leading to an extended period of several days in which extreme precipitation accumulated over southern Brazil.

Even though this pattern is consistent with typical ENSO teleconnections and impacts, stronger El Niño phases in the past have not resulted in such intense precipitation events (Fig. 1), and several factors could have been intensified by increasing global mean surface temperature (GMST). For instance, it is expected that climate change will intensify this teleconnection pattern[14]. Consequently, the high-pressure centre over central Brazil is becoming larger and more persistent, pushing warmer air that holds more moisture further south. Of the five biggest floods ever recorded in Porto Alegre (the capital of Rio Grande do Sul), three occurred in the nine months up to May 2024, the largest having occurred in May 2024 itself, and the fourth and fifth in November and September 2023, respectively. The second largest occurred in 1941 and third largest in 1873.

Existing literature analysing trends in extreme precipitation, and formal attribution of some of the most significant extreme precipitation and flooding events in South and Southeastern Brazil, suggest an increasing trend in the intensity and frequency of extreme precipitation in various regions. Ávila et al.[13] analysed precipitation trends and their link to flash floods and landslides in southeastern Brazil, revealing a significant increase in extreme precipitation from 1978 to 2014, especially over mountainous areas. These changes in precipitation patterns have already impacted streamflow in the region, with an increasing trend in floods between 1980 and 2015 over most of the river basins in southern Brazil[15]. Also, there have

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 4

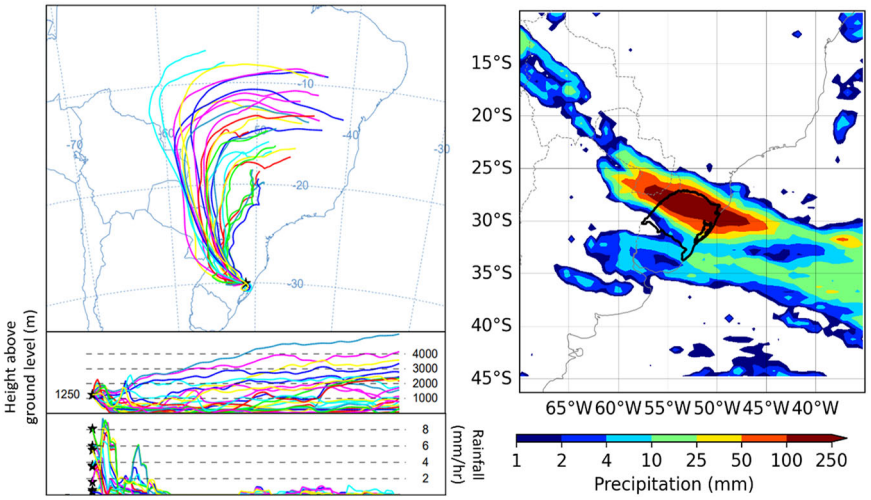


Fig. 3 | Backward trajectories of air masses and resultant precipitation totals over Rio Grande do Sul during late April - early May 2024. a (left) Ensemble of 5-day backward trajectories ending in Porto Alegre, Rio Grande do Sul (30.04°S, 51.21°W) and at approximately 850 hPa (1250 m above ground level) on the 2 May. The map shows the horizontal transport pathways of air parcels, the middle panel shows the corresponding air parcel elevation (in metres), and the lower panel shows rainfall (in mm per hour). Source: NOAA Hysplit[83]. **b** (right) Satellite-based precipitation estimates on 02/05/2024 over central South America and Rio Grande do Sul (black). Data: IMERG (see 'Methods' for details).

been temporal and spatial changes in the occurrence of extreme events of precipitation in Santa Catarina[16], the state north of Rio Grande do Sul. Furthermore, for this specific event, an analogue-based analysis by Clima-Meter found that extreme precipitation events are up to 15% more intense in the period 2001–2023 compared to 1979–2000, studying an area over the eastern coast of Rio Grande do Sul (a box bounded by 48-53°W, 28-32°S), with an additional minor contribution from modes of variability including ENSO[17].

Studies by the Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) corroborate these findings, highlighting that the climate has already changed in Brazil over recent decades, impacting the occurrence of climate extremes, such as maximum precipitation in 5 days (RX5day). Observations over the last six decades, collected by the National Institute of Meteorology (INMET), show a notable change in climate patterns. The results indicate an increase of between 10 and 30% in the southern region of Brazil[18]. This is consistent with the findings of the IPCC AR6[19], which show that increases in the frequency and intensity of heavy precipitation events over this region have been observed in the past. With additional increases in warming levels (model projections for a particular level of warming with respect to pre-industrial climate), these events are expected to become more frequent and more intense. These wetter conditions will likely lead to longer periods of flooding and enhanced river discharges[20].

Based on CMIP6 climate models, Medeiros et al.[21] found that Brazil is projected to experience an increasing tendency for severe and prolonged extreme precipitation, especially in the central north and the southern parts (Almazroui et al.[22]; IPCC[19]). Other studies based on CMIP5 climate models came to similar conclusions: southern Brazil is expected to have a wetter mean climate along with widespread increases in the intensity of wet days for the period 2050–2100 as compared to the present day in southern Brazil, as well as higher precipitation variability (see Fig. 3 in Alves et al.[23]; Cai et al.[14]).

Given the evidence of increasing trends in precipitation extremes in southern Brazil, further enhancing understanding of these hazards is of clear societal significance. Beyond considering trends, individual disasters provide learning opportunities for managing risks, especially in a constantly changing climate. The 2024 event was unprecedented in scale, both in terms of meteorology and impacts, for the region. Even more than other events, such record-breaking disasters show what is plausible and therefore provide critical case studies. To understand the changing risk of such events, this study aims to elucidate the respective roles of anthropogenic climate change and the preceding ENSO conditions in the likelihood and intensity of such a hazard, as well as placing it in the context of vulnerability and exposure factors that drive such disasters.

In the wake of the 2024 event, World Weather Attribution undertook a rapid study on the extreme precipitation and the vulnerability and exposure factors contributing to the disaster[24]. To capture the nature of the precipitation that resulted in extreme flooding across Rio Grande do Sul, this study analysed two event definitions: the March-May maximum 4- and 10-day accumulations, averaged over the state of Rio Grande do Sul (Fig. 1 and S3). Extreme precipitation occurring during the March-May season specifically was selected because, despite the relatively flat mean seasonal cycle of precipitation in the region, different mechanisms leading to precipitation extremes are prevalent at different times of year, including the influence of ENSO. There is also greater variability exhibited in extremes in the austral spring and early summer period from September to December (Fig. 1, S3). Two temporal definitions arose because the 4-day window captured the most severe single event in which record precipitation fell across several consecutive days, while the 10-day window (encompassing 26th April–5th May, inclusive) captured the succession of heavy precipitation events, including the very wet individual days on either side of the major 4-day peak (Fig. 1, S2). However, despite characterising different extremes, the results were not significantly different for the two event definitions, largely due to the extreme magnitude of the largest 4-day period dominating both event definition.

The rapid study analysed the influence of both the observed GMST rise of 1.2 °C since preindustrial times and the preceding El Niño (using the relative December–February (DJF) Niño3.4 index; see Methods) on the extreme precipitation event, as well as the relative influence of a further 0.8 °C of warming from 2024. This work primarily aims to introduce this analysis of ENSO alongside GMST, using a common probabilistic event attribution framework, into the scientific literature. It also builds on the original study in several ways, focusing on the 4-day event definition (henceforth rx4day). First, an additional gridded observational dataset is analysed, and the event itself is included is all datasets from the original study. Second, the sensitivity of the results to different statistical models is tested, including the choice of covariates, and the statistical distribution and its parametrisations. Third, the model-based analysis is extended to a global warming level of 2.6 °C above preindustrial levels (1.4 °C above 2024). This level aligns with the latest Emissions Gap Report[25] from the United Nations Environment Programme, reflecting the likely temperature rise given currently implemented policies.

Results

Observational analysis

Five gridded observational (CPC, GPCC, CHIRPS, and BR-DWGD) and reanalysis-based (MSWEP) datasets (see 'Methods' for further details of all datasets) are used to determine the return period of the observed event in the current climate and the changing likelihood of such an event due to observed GMST warming of 1.2 °C and the preceding El Niño event. Time series of the March–May maxima of 4-day precipitation in each of these datasets are shown in Fig. 4. At the time of the initial rapid study, the event was observed only in CPC and MSWEP. The current study includes

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 5

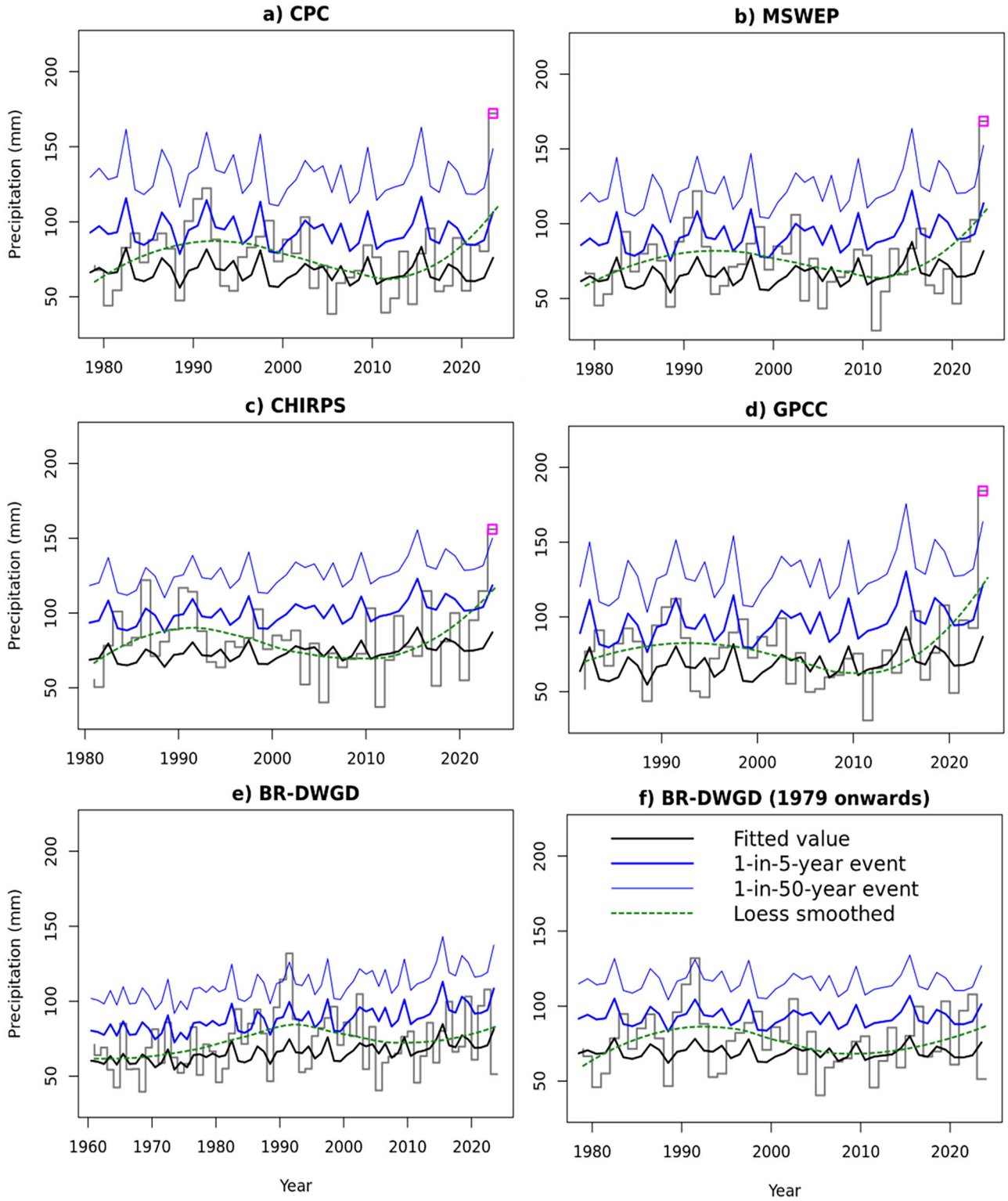


Fig. 4 | March–May maxima of 4-day accumulated precipitation over Rio Grande do Sul in the five observational and reanalysis datasets, including BR-DWGD at longer and shorter baselines (grey lines). a CPC, **b** MSWEP, **c** CHIRPS, **d** GPCC, **e** BR-DWGD, **f** BR-DWGD (from 1979–onwards). The solid black line shows the fitted trend associated with increasing GMST and variability due to Niño3.4; the blue lines show the expected magnitude of 1-in-5-year and 1-in-50-year events under the same statistical model. The dotted green line shows a nonparametric Loess smoother fitted to the observations. The 2024 event is shown as a pink box.

updated data for both CHIRPS and GPCC, including the event and adds the BR-DWGD dataset up to March 2024. However, this has not notably changed the estimated return periods of the event(s) or the overall conclusions of the study.

The rapid study used a nonstationary generalised extreme value (GEV) distribution that scales with covariates of GMST and ENSO to model changes in the extreme index rx4day. In this study, the choice of model was tested using goodness of fit and sensitivity analyses, for different formulations of the relationship between extreme index and the covariates (Table 4), as well as different combinations of covariates and use of the Gumbel and Gaussian distributions rather than the GEV (Tables 4, 5 and 6). On balance, the GEV scaling with GMST and ENSO provided the best compromise between goodness of fit and model complexity across observations and models, and in capturing the extreme tail of the distribution in which the event lies (Figs. 5, 9 and 10). While other parametrisations were rejected and may give different quantitative results, the overall qualitative

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 6

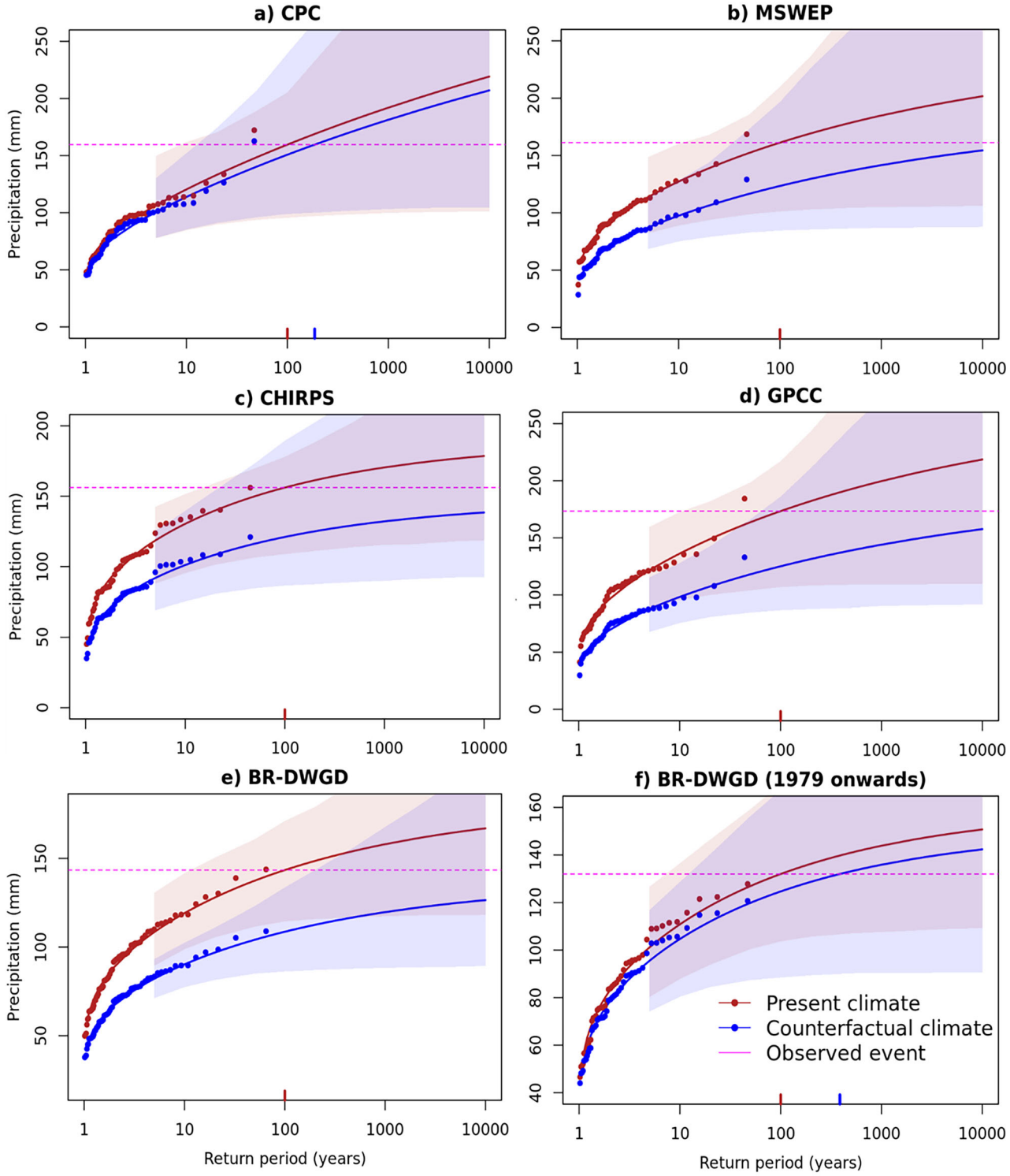


Fig. 5 | Return period plots for the 4-day event for five observational and reanalysis datasets used in this study. a CPC, **b** MSWEP, **c** CHIRPS, **d** GPCC, **e** BR-DWGD, **f** BR-DWGD (from 1979–onwards). Data points represent the full times series of Rx4day for each dataset, scaled to the current climate and a climate without anthropogenic warming. The observed event is shown by the highest red dot and the pink line labelled as the 'observed event' represents the 1 in 100-year event used in this analysis. The shaded areas represent the bootstrapped 95% confidence intervals on the curves, and the degree of overlap between the uncertainty bounds of each curve gives an indication of the uncertainty on the overall uncertainty on the influence of GMST, as quantified in Table 1.

messages of the analysis are unlikely to be affected. For further understanding of the sensitivity of the analysis, results of the observation-based analysis using a model without ENSO (GMST-only), and annual rather than March-May maxima, are shown in the supplementary material (Tables S1 and S2). Results of the whole analysis using the Gaussian distribution are also shown in the supplementary material (Tables S3 and S4). None of these results change the overall messages of the study.

Across all datasets, the 2024 event was unprecedented (Fig. 4) and thus found to be extremely rare in the current climate, with return periods of ~100–250 years and uncertainty ranges from ~20 years to infinity (Table 1). To ensure the statistical stability of the analysis given the relatively short data records (mostly ~1979–present), we analyse the 1 in 100-year event in this study. This choice does not affect the attributable changes in magnitude and will result in a slightly lower and better constrained probability ratio compared to a higher return period event. This return period is also typically considered a benchmark for risk analysis.

All datasets show increasing trends in the likelihood and intensity of 1 in 100-year precipitation events in the region because of both warming

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 7

Table 1 | Observed magnitude and return period of the 4-day accumulations in late April and early May 2024 and change in probability ratio and magnitude for 1 in 100-year 4-day accumulations in Rio Grande do Sul, due to both GMST and ENSO

Dataset	Observed event		Magnitude of 1 in 100-year event in 2024 climate (mm)	Influence of GMST (95% confidence intervals)		Influence of ENSO (95% confidence intervals)	
	Magnitude (mm)	Return period		Probability Ratio	Change in magnitude (%)	Probability Ratio	Change in magnitude (%)
CPC	172.2	234.0 (22.46– inf)	159.6	1.86 (0–inf)	5.84 (−33.1–85.8)	**3.24 (1.29–inf)**	**10.8 (3.14–23.22)**
MSWEP	168.6	188.88 (20.58– inf)	161.2	498.03 (0.0001–inf)	30.57 (−18.2–108)	**4.90 (1.36–inf)**	**10.66 (3.06–22.17)**
CHIRPS	156.1	99.13 (14.76– inf)	156.1	Inf (0–inf)	28.97 (−23.2–94.8)	4.56 (0.81–inf)	6.60 (0.81–16.07)
GPCC	184.3	237.78 (23.81– inf)	173.3	6376.1 (0.17–inf)	38.67 (−12.3–117.6)	**5.13 (1.20–inf)**	**11.27 (2.71–25.33)**
BR-DWGD	N/A	N/A	147.8	**Inf (5.29–inf)**	**38.82 (10.45–73.5)**	**6.17 (1.21–inf)**	**8.12 (1.18–15.66)**
BR-DWGD (1979 onwards)	N/A	N/A	136.5	248.77 (0–inf)	13.89 (−15.22– 62.01)	**8.60 (1.12–inf)**	**7.79 (0.74–16.92)**

The 95% confidence intervals are shown in brackets. Bold text shows where the result is statistically significant at the 95% level.

GMST and El Niño conditions (Fig. 5, Table 1). Though the best estimates show positive trends, the estimated trends in likelihood with GMST for all datasets have very wide uncertainty ranges, with all upper limits tending to infinity, and lower limits significantly below 1. In the case of CPC and CHIRPS, the uncertainty range is between 0 and infinity, thus giving no useful information at the 95% confidence level. The BR-DWGD dataset also has both best estimates and upper bounds at infinity, which suggests a very strong trend, but one which cannot be quantified. As a result, these three datasets are excluded from the final synthesis.

The reason for this wide uncertainty range can be probed further by investigating the statistical model. Figures 4 and 5 show the statistical model fit to each dataset, with GMST and ENSO as covariates. In Fig. 4, the dashed green line indicates a nonparametric loess trend fitted to each dataset. This highlights that in all datasets there is a weak decadal oscillation, which peaks in the mid-1990s, decreases until around 2010, and then increases again. One candidate to explain this is the Pacific Decadal Oscillation (PDO), a large-scale pattern of variability (representing a group of interacting processes) in surface temperatures of the North Pacific[26]. However, in observational and reanalysis data, incorporating the PDO alongside GMST (see Methods) resulted in a worse fit overall when compared against either GMST and ENSO, or GMST alone (Table 7).

Consequently, we were unable to identify a covariate that adequately captures this behaviour in the statistical model, but note that because of this unexplained variability, there is very high uncertainty about the relationship between GMST and historical extreme precipitation in this region. This is further confirmed by estimating the trends in the BR-DWGD time series across different time horizons—while the trend from 1960 onwards is statistically significant, the trend from 1979 onwards in the same dataset (matching most of the other datasets) has 95% uncertainty bounds from 0 to infinity. Therefore, while the full longer timescale dataset (1960–2024) cannot be integrated into the synthesis quantitatively, it adds an additional line of evidence in favour of increasing extremes on a qualitative level. Finally, Fig. 5 shows the return curves for each statistical model and the associated dataset. While the BR-DWGD, MSWEP and GPCC data are well represented by the respective curves, CPC and CHIRPS exhibit significant variation, with wide and overlapping uncertainty ranges between the present and preindustrial climates.

Despite the unexplained oscillation and wide uncertainty ranges, the consistency of the increase across datasets combined with physical reasoning suggests a likely increase in such extremes with warming. Similar analysis using climate models, as undertaken in the following section, is therefore required to further explore the quantification of this effect. Finally, the results on the influence of ENSO are much more confident than for GMST in the observational analysis. Compared to a neutral ENSO phase, the current (DJF) El Niño index value of 1.107 resulted in a clear and consistent increase across all datasets and for both events: by a factor of 3–6 in PR and 6–11% in intensity, with four of the five datasets providing statistically significant results (Table 1).

Attribution synthesis

To assess the attributable influence of anthropogenic climate change and the ENSO phase on the 1 in 100 year value of the rx4day index, we synthesise evidence from both observation-based products and climate models, using a peer-reviewed probabilistic attribution synthesis procedure[27]. Prior to this synthesis, climate models were evaluated for their ability to reproduce precipitation patterns and extremes in the region (see 'Methods' and Supplementary Material; Figs. S4–9, Table S5). This is contingent in part on the ability of the models to represent the underlying dynamics, such as the SALLJ and associated trends in rates of moisture transport[28]. Recent work shows that state of the art GCMs and RCMs are increasingly able to capture this phenomenon, either directly[29] or indirectly through accurate representation of precipitation extremes[30,31]. Additionally, during the model evaluation step, the ability of models to capture the relevant phenomena is implicitly assessed by comparing the fitted statistical model parameters to those of the observation-based products (see 'Methods' and Supplementary Material; Table S5). Nonetheless, changes in such dynamics over time remain a source of deep uncertainty in the results presented here. This could be minimised by isolating the thermodynamic influence using a storyline approach[32], or investigated further through changes in atmospheric winds and moisture transport[29], though such analyses are beyond the scope of this study.

In the model evaluation step, no models or ensemble members were ranked as 'good' across all criteria (Table S5). We therefore use models that were ranked as 'reasonable' overall and reject those with any 'bad' aspects. Overall, this left 9 of 13 CORDEX models, all 11 CMIP6 models, 2 of 3 AM2 ensemble members and 7 of 10 FLOR ensemble members. Following the evaluation step, we use the same statistical model that accounts for GMST and ENSO for the models and observation-based products to evaluate their respective influences, estimating the parameters separately for each individual dataset Table 2. Combining the results from observational/reanalysis datasets and model ensembles using the synthesis procedure (see Methods) gives an overarching attribution statement. Figures 6–8 show the changes in probability and intensity for the observations (blue), models (red) and synthesis (magenta), for the GMST increase of 1.2 °C (Fig. 6), the preceding DJF El Niño (Fig. 7), and future GMST increase to 2.6 °C above preindustrial (Fig. 8).

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 8

Table 2 | Observational and model attribution results for 4-day MAM maxima precipitation events in Rio Grande do Sul

Model/observations	Threshold for 100-year return period event (mm)	GMST		ENSO	
		Probability ratio PR	Change in intensity ΔI [%]	Probability ratio PR	Change in intensity ΔI [%]
BR-DWGD	147.8	2.7e + 20 (5.3 … 3.6e + 79)	39 (10 … 74)	6.2 (1.2 … 8.2e + 2)	8.1 (1.2 … 16)
CPC	159.58	1.9 (0.0 … ∞)	5.8 (−33 … 86)	3.2 (1.3 … 51)	11 (3.1 … 23)
MSWEP	161.22	5.0e + 2 (0.00061 … 2.7e + 20)	31 (−18 … 1.1e + 2)	4.9 (1.4 … 2.3e + 2)	11 (3.1 … 22)
GPCC	173.39	6.4e + 3 (0.17 … 3.4e + 17)	39 (−12 … 1.2e + 2)	5.1 (1.2 … 4.0e + 2)	11 (2.7 … 25)
CHIRPS	156.13	∞ (0.0 … ∞)	29 (−23 … 95)	4.6 (0.81 … 8.1e + 2)	6.6 (-0.81 … 16)
CORDEX					
CanESM2_rcp85_RCA4 (1)	123.20	5.0e + 2 (0.87 … ∞)	20 (−1.6 … 36)	19 (2.0 … ∞)	12 (6.2 … 19)
GFDL-ESM2M_rcp85_RCA4 (1)	94.88	52 (1.8 … ∞)	32 (5.1 … 68)	4.6 (1.9 … ∞)	13 (6.6 … 22)
HadGEM2-ES_rcp85_RCA4 (1)	80.76	2.1 (0.18 … ∞)	4.1 (−15 … 21)	1.9 (0.74 … ∞)	3.8 (−1.8 … 10)
HadGEM2-ES_rcp85_RegCM4-7 (1)	116.89	65 (0.15 … ∞)	8.4 (−6.5 … 24)	1.4 (0.33 … ∞)	1.1 (−5.4 … 6.8)
MPI-ESM-LR_rcp85_RCA4 (1)	93.82	1.2 (0.25 … 39)	4.4 (−19 … 37)	1.5 (0.70 … 4.3)	7.9 (−5.1 … 22)
MPI-ESM-LR_rcp85_REMO2009 (1)	209.33	2.6 (1.1 … 9.2)	22 (2.7 … 46)	1.1 (0.76 … 1.8)	1.9 (−5.6 … 11)
MPI-ESM-MR_rcp85_RegCM4-7 (1)	154.47	47 (0.90 … ∞)	39 (−1.6 … 93)	2.5 (0.68 … ∞)	9.9 (−3.5 … 30)
NorESM1-M_rcp85_RCA4 (1)	99.44	1.2e + 2 (2.3 … ∞)	32 (8.1 … 59)	2.3 (1.2 … ∞)	6.7 (2.1 … 12)
NorESM1-M_rcp85_RegCM4-7 (1)	130.24	2.1e + 2 (0.16 … ∞)	20 (−11 … 58)	21 (1.8 … ∞)	14 (4.0 … 25)
CMIP					
EC-Earth3_ssp585_r1i1p1f1 (1)	124.37	(0.35 … 15)	2.5 (−12 … 20)	2.1 (1.0 … 5.4)	7.5 (0.42 … 15)
EC-Earth3-CC_ssp585_r1i1p1f1 (1)	139.36	2.1 (0.66 … 22)	7.2 (−4.7 … 19)	4.0 (1.9 … 20)	13 (5.9 … 20)
EC-Earth3-Veg-LR_ssp585_r1i1p1f1 (1)	113.64	8.0 (0.79 … ∞)	13 (−1.5 … 31)	5.1 (1.6 … 82)	11 (3.3 … 18)
INM-CM4-8_ssp585_r1i1p1f1 (1)	91.03	11 (0.77 … ∞)	21 (−2.4 … 51)	0.62 (0.28 … 1.4)	−4.8 (-11 … 2.7)
INM-CM5-0_ssp585_r1i1p1f1 (1)	113.86	0.76 (0.092 … 30)	−3.6 (−32 … 33)	1.2 (0.60 … 2.8)	2.7 (−5.1 … 11)
KACE-1-0-G_ssp585_r1i1p1f1 (1)	179.00	0.74 (0.25 … 2.5)	−3.8 (−18 … 12)	1.2 (0.71 … 2.0)	2.0 (−3.8 … 8.4)
MIROC6_ssp585_r1i1p1f1 (1)	162.77	1.1e + 2 (0.63 … ∞)	28 (−4.5 … 63)	9.6 (2.2 … ∞)	16 (6.5 … 26)
MPI-ESM1-2-HR_ssp585_r1i1p1f1 (1)	148.67	0.50 (0.10 … 7.5)	−7.6 (−27 … 16)	2.4 (1.3 … 6.9)	9.5 (2.6 … 17)
MPI-ESM1-2-LR_ssp585_r1i1p1f1 (1)	126.27	0.67 (0.13 … 4.1)	−5.1 (-24 … 16)	2.1 (1.2 … 4.4)	9.5 (2.3 … 17)
NESM3_ssp585_r1i1p1f1 (1)	111.33	0.87 (0.23 … 4.8)	−1.1 (−10 … 10)	2.5 (0.99 … 21)	6.8 (−0.043 … 13)
NorESM2-LM_ssp585_r1i1p1f1 (1)	108.34	1.4 (0.073 … 1.6e + 2)	3.0 (−23 … 34)	1.8 (0.73 … 6.4)	4.8 (−2.2 … 14)
AM2.5C360 (2)		5.5 (0.68 … 5.3e + 2)	11 (-2.4 … 26)	2.4 (1.1 … 9.4)	6.1 (1.1 … 12)
Ensemble member 6	86.47	9.6 (1.6 … 5.3e + 2)	16 (3.5 … 30)	1.4 (0.56 … 5.1)	2.1 (−3.2 … 8.1)
Ensemble member 7	77.49	3.2 (0.30 … 5.0e + 2)	6.8 (−7.8 … 22)	4.2 (2.0 … 17)	10 (5.7 … 15)
FLOR (7)		6.0 (0.27 … 6.8e + 3)	9.1 (0.87 … 18)	4.3 (0.86 … 48)	6.9 (4.5 … 9.5)
Ensemble member 1	82.62	1.2e + 2 (4.9 … ∞)	16 (6.7 … 26)	3.8 (1.8 … 13)	5.9 (3.2 … 8.7)
Ensemble member 2	77.95	1.6e + 4 (2.0 … ∞)	11 (2.5 … 21)	34 (5.2 … ∞)	7.8 (5.3 … 10)
Ensemble member 3	78.18	16 (0.93 … ∞)	7.8 (-0.25 … 17)	11 (3.6 … ∞)	7.1 (4.7 … 9.8)
Ensemble member 5	79.13	2.4 (0.79 … 11)	5.8 (-1.5 … 13)	2.5 (1.7 … 6.1)	6.2 (3.9 … 8.6)
Ensemble member 8	78.88	12 (1.2 … ∞)	11 (1.0 … 21)	3.6 (2.1 … 9.1)	5.9 (3.3 … 8.5)
Ensemble member 9	77.34	10 (1.2 … 1.1e + 8)	11 (1.4 … 21)	3.6 (2.2 … 11)	6.6 (4.3 … 9.0)
Ensemble member 10	74.58	4.7 (0.71 … ∞)	5.4 (−1.4 … 13)	14 (3.9 … ∞)	8.3 (6.2 … 11)

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 9

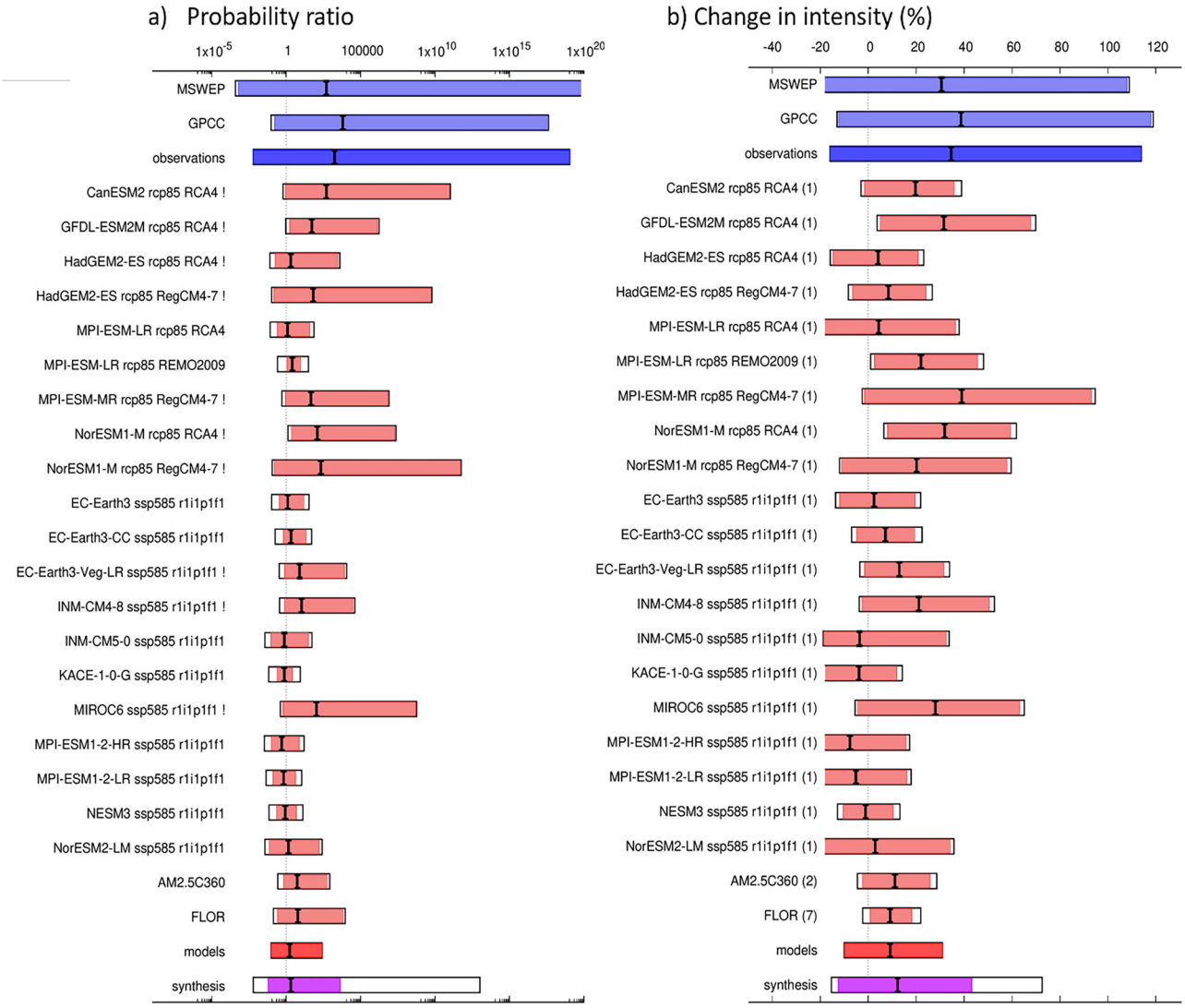


Fig. 6 | Synthesis of probability ratios (left) and intensity changes (%: right) when comparing the return period and magnitudes of the 1 in 100-year MAM 4-day max precipitation over Rio Grande do Sul in the 2024 climate and a 1.2 °C cooler climate. The best estimate for each dataset is shown by the central black line, with the uncertainty range given by the width of the bar (see Methods and references therein for full details). In **a**, the '!' next to some model names shows where the upper bound was infinite, and the x-axis for probability ratio is capped at 10^{20}. In **b**, the number in brackets by each model shows the number of ensemble members included in the estimates of probability ratio and change in intensity.

While the uncertainties around the observations and some models are very large, the overall picture is consistent: all observational datasets and 17 of 22 (77%) models show increases in rx4day due to a 1.2 °C increase in GMST (Fig. 6). This level of model agreement exceeds the 'likely' threshold from Mastrandrea et al. (2011)[33], commonly used by the IPCC. The increase with GMST is further reinforced by the longest observational dataset, BR-DWGD, which indicated a strong statistically significant trend when using data from 1960 onwards, which reduced the influence of interdecadal variability (Table 1). Similarly, for ENSO all observational datasets and all but one model (95%) show an increase in rx4day due to the 2023/24 El Niño (Fig. 7). When quantifying these effects, the synthesis results show that GMST warming of 1.2 °C resulted in an increase in likelihood by about a factor of 2.0 (~0.06 to 4200) and an intensity increase of 12% (~−12% to +43%), and the El Niño resulted in an increase in likelihood by about a factor of 2.4 (~0.7 to 37) and an intensity increase of 9% (0.3% to 20%) relative to a neutral phase (Table 3). Using a Gaussian distribution rather than a GEV gives a similar message, with very similar changes in intensity and probability ratios approximately a factor of 1.5–2.5 larger than for the GEV (Table S4).

The attributed anthropogenic influence is further corroborated by assessing the change in likelihood and intensity in a 1.4 °C warmer climate compared to the time of the observed event (2.6 °C above preindustrial). Again, there are relatively large uncertainties for individual models but an overall increasing likelihood, with probability ratio of around 1.7 (~0.5–30) and an intensity change of about 7% (~−6 to +19%) (Table 3; Fig. 8). While the model-based estimates are consistently much lower than observations to date, and slightly below physical expectations from the Clausius-Clapeyron relation, we are not confident in stating whether these estimates are likely conservative given the very wide observational uncertainty ranges.

Discussion

The unprecedented floods in Rio Grande do Sul in April–May 2024 affected over 90% of the municipalities in the state, or an area equivalent to the UK, displacing around 600,000 people and causing over 180 deaths. The overall risk of such a catastrophe depends on three key factors: hazard, exposure and vulnerability. This study explores the key drivers of the hazard. However, it is crucial to place these results in the context of vulnerability and exposure factors, to assess the changing likelihood of such impacts both now and in the future, with the latter depending on policy choices at a range of different scales.

First, while the state is often perceived as well-off, it still has significant pockets of poverty and marginalisation. Low income is strongly correlated

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 10

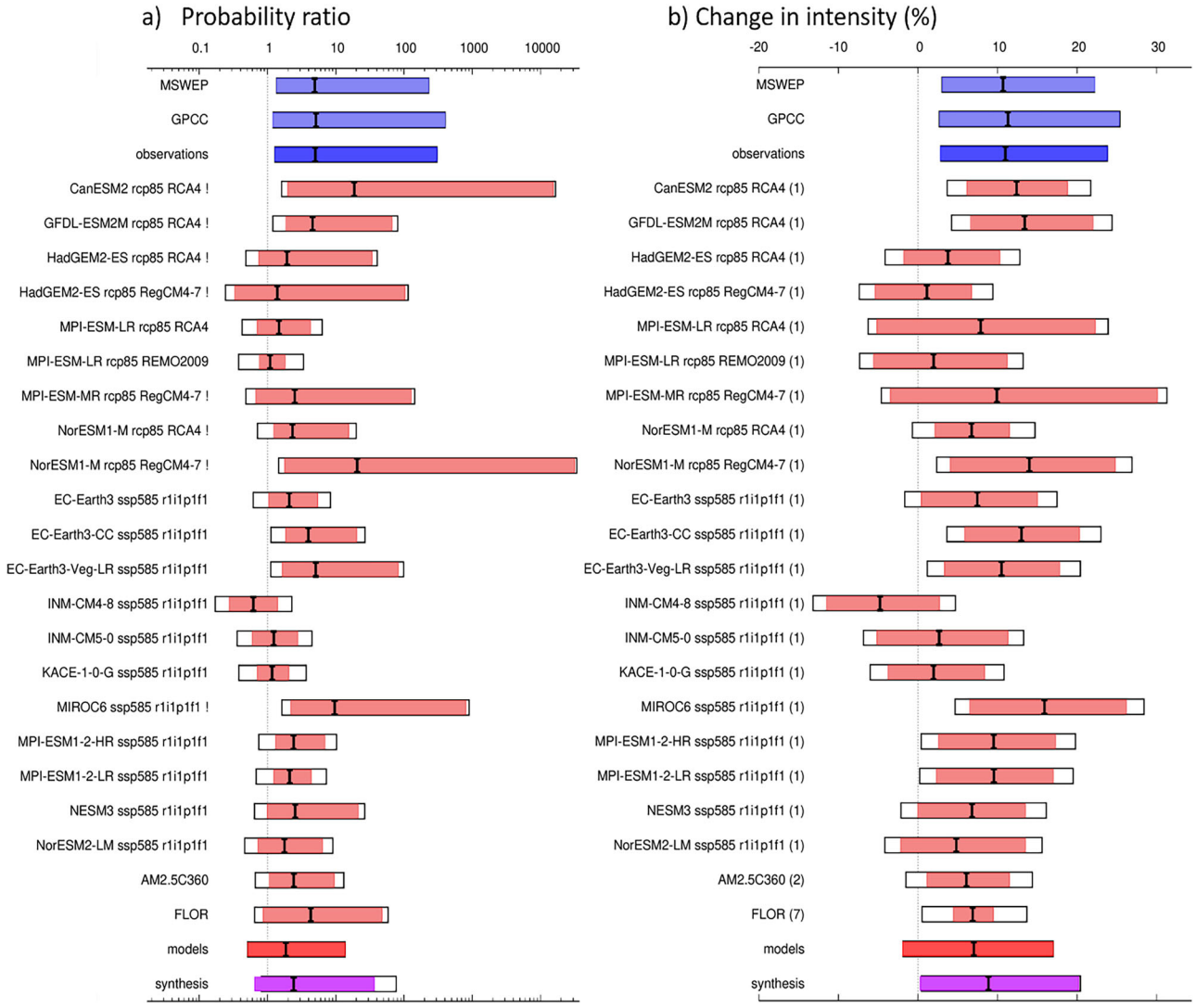


Fig. 7 | Synthesis of probability ratios (left) and intensity changes (%: right) when comparing the return period and magnitudes of the 1 in 100-year MAM 4-day max precipitation over Rio Grande do Sul in the current El Niño event and a neutral ENSO phase. The best estimate for each dataset is shown by the central black line, with the uncertainty range given by the width of the bar (see Methods and references therein for full details). In **a**, the '!' next to some model names shows where the upper bound was infinite. In **b**, the number in brackets by each model shows the number of ensemble members included in the estimates of probability ratio and change in intensity.

with higher vulnerability to flood impacts[34]. Informal settlements, indigenous villages, and predominantly quilombola (descendants of enslaved Africans) communities have been severely impacted[35–37]. The lack of a significant extreme flood event until recently in Porto Alegre contributed to reduced investment and maintenance of its flood protection system[38–40], with the system reportedly beginning to fail at 4.5 m of flooding despite its stated capacity to withstand water of 6 m[41]. This, in addition to the extreme nature of this event, contributed to the significant impacts of the flood and points to the need to objectively assess risk and strengthen flood infrastructure to be resilient to this and future, even more extreme, floods.

Furthermore, while environmental protection laws exist in Brazil to protect waterways from construction and limit land use changes, they are not consistently applied or enforced, leading to encroachment on flood-prone land and therefore increasing the exposure of people and infrastructure to flood risks[42–44]. Finally, forecasts and warnings of the floods were available nearly a week in advance[45,46], but the warning may not have reached all of those at risk, may not have adequately communicated the potential severity of the impacts or informed people of what actions to take in response to the forecasts. It is imperative to continue to improve the communication of risk that leads to appropriate, life-saving action.

The precipitation hazard itself was unprecedented. The 4-day precipitation totals over Rio Grande do Sul were found to be extremely rare in the current climate, with a return period of 100–250 years. This study focused on a 1 in 100-year return period event, which is also typically considered a benchmark for risk analysis. First, ENSO was found to be important to explain the variability in the observed precipitation, consistent with previous research. Most previous heavy precipitation events in the area occurred during El Niño years and similarly the role of El Niño in this event was significant. In observations, compared to a neutral ENSO phase, the current (December-February) El Niño resulted in a consistent increase across all datasets, indicating its importance in the analysis. Second, to assess the role of human-induced climate change and ENSO we combine observation-based products and climate models that include the observed ENSO relationship and assess changes in the likelihood and intensity for the 4-day heavy precipitation over Rio Grande do Sul. Results suggest that the El Niño conditions at the time of occurrence drove an increase in likelihood by about a factor of 2.4 (0.7–37) and an intensity increase of 9% (0.3–20%) relative to a neutral phase.

Third, GMST has driven an increase in likelihood of a factor of 2 (0.06–4200) and intensity increase of ~12% (−13% to +43%). These findings are corroborated when looking at a climate of 2.6 °C of global warming since pre-industrial times, where we find a further increase in likelihood of a factor of ~1.7 (0.5–30) and an increase in intensity of about 7% (−6% to +19%) compared to the 1.2 °C world of 2024. Almost none of

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 11

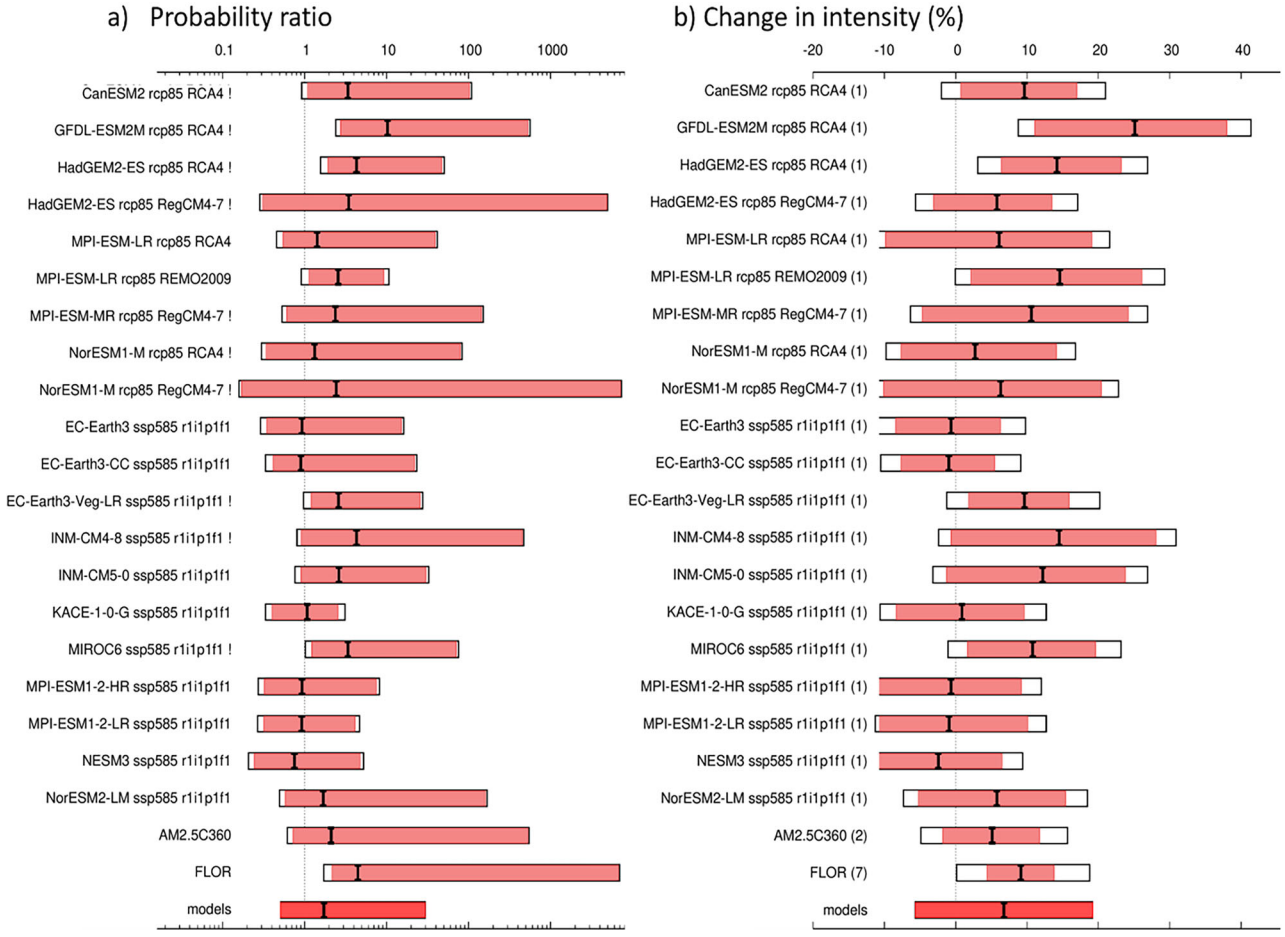


Fig. 8 | Synthesis of probability ratios (left) and intensity changes (%: right) when comparing the return period and magnitudes of the 1 in 100-year MAM 4-day max precipitation over Rio Grande do Sul in the 2024 climate and a 1.4 °C warmer climate. The best estimate for each dataset is shown by the central black line, with the uncertainty range given by the width of the bar (see Methods and references therein for full details). In **a**, the '!' next to some model names shows where the upper bound was infinite. In **b**, the number in brackets by each model shows the number of ensemble members included in the estimates of probability ratio and change in intensity.

Table 3 | Summary of results for 1 in 100 year 4-day March–May maximum precipitation, presented in Figs. 6–8: changes due to GMST include past-present changes and present-future changes for the El Niño state of 2023/24, changes due to ENSO include El Niño versus neutral phases in the present climate

Data	GMST			ENSO (El Niño vs. Neutral)	
	Time period	Probability ratio (95% CI)	Intensity change (%) (95% CI)	Probability ratio (95% CI)	Intensity change (%) (95% CI)
Observations	**Past- Present**	1780 (0.0061– 10^{20})	34.6 (−16.0–114)	**4.39 (1.08 – 254)**	**9.82 (1.02–22.5)**
Models		1.71 (0.096–260)	9.13 (−9.94–31.0)	1.86 (0.51–13.7)	7.03 (−1.90–17.0)
Synthesis		2.04 (0.063–4210)	12.3 (−12.5–43.2)	2.42 (0.65–36.6)	**8.87 (0.30–20.2)**
Models only	**Present- Future**	1.73 (0.51–29.8)	6.77 (−5.68–19.2)	N/A	N/A

The 95% confidence intervals are shown in brackets. Bold text shows where the result is statistically significant at the 95% level.

these synthesis results are significant at the 95% confidence level, and the probability ratios have wide uncertainty ranges. These uncertainty ranges result in part from an apparent recent decadal variability in many observational times series since ~1980. This variability does not appear in the period 1960–1980 in the only reliable daily gridded dataset available for such a period, but further investigation of this is hampered by the dearth of other such datasets. As a result, the quantification of the role of GMST remains challenging.

However, there are several lines of evidence that suggest that GMST amplified this precipitation event (as well as the El Niño conditions, by a similar amount), suggesting that strong qualitative messages may be drawn. These are as follows. First, the consistency of increasing trends (albeit with high uncertainties) across gridded observational datasets and models, and across statistical models. Second, the Clausius-Clapeyron relation gives a robust underlying physical basis to expect such results. Third, the strong increase in such extremes since the 1960s in one dataset suggests that more recent decadal variability, likely unrelated to the influence of GMST, increased uncertainties across shorter datasets. Fourth, other scientific literature studying similar extremes using other methods comes to a similar conclusion.

Taken together, the hazard analysis in the context of vulnerability and exposure indicates that Rio Grande do Sul is likely to face more frequent and severe flood-related impacts in the future, especially without serious investment in mitigation and adaptation responses. The floods revealed the unequal distribution of flood protection infrastructure, which perpetuates inequalities in urban environments. Unprotected regions, typically inhabited by lower-income populations, face higher risks of flooding and associated impacts. This disparity creates a poverty trap, where those in

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 12

unprotected areas are more susceptible to flood-related disasters, leading to repeated losses and hindered economic progress. Addressing these issues requires a comprehensive approach to urban planning and flood management that prioritises equitable protection and development. Future investments in flood protection should integrate social, economic, and environmental considerations into urban planning to help create more inclusive and resilient cities.

Finally, given the unprecedented nature of the event, further work on the confluence of drivers may be informative. For instance, exploring if this event belongs to the same distribution as past extremes and was simply amplified by a combination of ENSO and GMST, or if other physical phenomena conspired to create a unique event that might be represented by a heavier-tailed or even separate extreme distribution[47].

Methods

Event details

Porto Alegre is situated on the Guaíba River, where five rivers meet. In May 2024, it saw water levels rise over 5 m—exceeding the 3-m flood threshold[48,49]. While the flood protection system is designed to withstand flooding of up to 6 m, reports suggest that malfunctioning floodgate motors and gaps between doors and the wall led the floodwaters to begin to enter the city 1.5 m below its stated capacity[41]. In addition, a partial dam collapse of the "14 de Julho" hydroelectric plant on the Das Antas River, some 180 km northwest of Porto Alegre, is reported to have caused an approximately 2-m flood wave, exacerbating the flooding in inundated communities nearby[50–52].

Due to the extensive flooding, five hydroelectric dams were shut down and power supplies had to be cut, leaving half a million people without electricity in and around Porto Alegre[53,54]. Only one of the city's six water treatment plants remained operational, leaving around 650,000 people—approximately a third of the state's population—without water[53,54]. About 3000 health care units were impacted, including 110 hospitals affected, 17 of which ceased operations entirely and 75 providing only partial services[35]. Relief efforts were severely hampered by extensive damage to infrastructure due to both flooding and landslides, with over 15,000 landslides triggered by the event[55]. 95 blockages were reported on highways throughout the state and Porto Alegre was almost completely cut off. The international airport did not reopen fully until the end of 2024[56].

The economic repercussions of the flooding are expected to be extensive; the state's economy represents accounts for around 6.6% of Brazil's GDP and preliminary estimates suggested a 0.3% decrease in national GDP as a result of the event[57]. Food production, which accounts for nearly 17% of the state's GDP, has been particularly impacted, with the Brazilian bank Bradesco forecasting a 3.5% recession in Brazil's agricultural sector in 2024 and potential price spikes, particularly on rice and dairy products, are a particular concern[58]. Overall damages from the event exceeded US$15 billion[59].

Rio Grande do Sul is highly susceptible to flooding due to its low elevation (10 m above sea level) and vast river systems. Extensive changes in land use and land cover have worsened this risk. A MapBiomas survey shows that from 1985 to 2022, the state lost 22% of its native vegetation (3.6 million hectares), mainly to soybean farming[42,60]. In the Guaíba Basin, where flood risks are highest, this figure rises to 26% (1.3 million hectares). The destruction of forests, fields, and wetlands has diminished the land's capacity to absorb precipitation, intensifying flood risk. Urban expansion and large-scale agriculture in the basin further exacerbate these hazards[40]. The state capital, Porto Alegre, has experienced significant floods in 1873, 1928, 1936, 1941, 1967, and 2023[40,43]. To protect Porto Alegre from recurring flooding, the city constructed a flood protection system in 1974, whose most prominent feature is the Mauá Wall; a 2.6 m long and 3-m-high concrete levee. This extensive system, that spans 68 km in total, comprises walls, levees, 23 pumping stations, and 14 floodgates[39,41,61].

In some regions, especially in the broad central strip of the valleys, plateau, hillside, and metropolitan areas, precipitation accumulations exceeded 300 mm in less than a week. For example, in the municipality of Bento Gonçalves, volumes reached 543.4 mm. From April 29–May 2, when heavy rain settled over Rio Grande do Sul, accumulations have ranged between 200 mm and 300 mm. In the capital, Porto Alegre, the volume reached 258.6 mm in just three days. This amount corresponds to more than 2 months' worth of rain, compared to the 1990–2020 climatological values for April (114.4 mm) and May (112.8 mm).

The INMET stations that recorded the most rain between April 26th and 9 am May 2nd were Soledade (488.6 mm), Santa Maria (484.8 mm), and Canela (460 mm). The conventional meteorological station in Santa Maria set a 24-h precipitation record with 213.6 mm on May 1st. This was the highest precipitation recorded in the municipality in 112 years of observation, surpassing the previous record of 182.3 mm set on June 23rd, 1944. In just 3 days, the precipitation total in the city reached 470.7 mm, which corresponds to 3 months' worth of rain according to the climatological 1990–2020 average.

A comparison between major precipitation and flooding events in 1941 and 2024 shows that while in 1941, it took 22 days for the water level in Guaíba Lake to reach 4.76 m above normal levels, in 2024 it took only 5 days for the Guaíba to exceed 5 m[49] (Fig. S1), well above the flood level of 3 m necessary to flood the city[48]. Moreover, the 2024 event flooded not just Porto Alegre but parts of 90% of municipalities in the state, with all the excess water flowing eventually to Guaíba. In 1941, less rain fell, but combined with strong winds from the south was enough to cause disastrous flooding. Consequently, the 2024 floods are also more impactful. The 1941 event flooded 15,000 homes and left 70,000 people homeless. A third of the region's commerce and industry were closed for around 40 days. The 2024 event affected the whole state and many more cities, more than 2.1 million individuals, with 600,000 people displaced and 76,000 citizens living in shelters just in the metropolitan area of Porto Alegre. The area was also still recovering from floods in September and November 2023 in which Guaíba reached 3.18 m and 3.46 m[49].

Observational data

In this study, we use six observational and reanalysis datasets to visualise and analyse changing precipitation extremes:

1. IMERG—This product uses NASA's Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) algorithm for combining information from the GPM satellite constellation to estimate precipitation over the majority of the Earth's surface. IMERG fuses precipitation estimates collected during the TRMM satellite's operation (1998–2015) with recent precipitation estimates collected by the GPM mission (2014–present). IMERG is available from 1998 to present in near real-time with estimates of Earth's precipitation updated every half-hour. Here, daily data are used with a spatial resolution of 0.5° × 0.5°.
2. CPC daily precipitation. This is the gridded product from NOAA PSL, Boulder, Colorado, USA known as the CPC Global Unified Daily Gridded data, and is available at 0.5° × 0.5° resolution, for the period 1979–present. Data are available from NOAA (https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html).
3. The Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) v2.8 dataset (updated from ref. 62 is fully global, available at 3-hourly intervals and at 0.1° spatial resolution, available from 1979 to ~3 h from real-time. This product combines gauge-, satellite-, and reanalysis-based data.
4. The precipitation product developed by the UC Santa Barbara Climate Hazards Group called "Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data" (CHIRPS)[63]. Daily data are available at 0.05° resolution. The product incorporates satellite imagery with in-situ station data.
5. GPCC Full Data Daily Product Version 2022 of daily global land-surface precipitation totals based on precipitation data provided by national meteorological and hydrological services, regional and global data collections as well as WMO GTS-data[64].

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 13

6. Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD) is available for the entire land surface of Brazil at spatial resolution of 0.1° × 0.1°, from 1961/01/01–2024/03/20[65].

As a measure of anthropogenic climate change, we use the (low-pass filtered) global mean surface temperature (GMST), where GMST is taken from the National Aeronautics and Space Administration (NASA) Goddard Institute for Space Science (GISS) surface temperature analysis (GISTEMP)[66,67].

As a measure of the El Niño—Southern Oscillation cycle (ENSO), we use the detrended relative Niño3.4 index. This is the Niño3.4 index (average SST over 5°S–5°N, 120°–170°W) minus the SST between 20°S and 20°N to adjust the index for climate change, as proposed in ref. 68, but without rescaling each calendar month.

Finally, as a measure of the Pacific Decadal Oscillation (PDO), we use the index defined by Mantua et al.[84]. This is the leading principal component of monthly sea surface temperature anomalies, in the North Pacific Ocean, poleward of 20°N. The monthly mean global average SST anomalies are removed to separate this pattern of variability from global warming.

Model and experiment descriptions

We use a collection of model ensembles with very different framings[69]: two multi-model ensembles from climate modelling experiments—one a regional climate model ensemble and one a coupled global circulation model ensemble—and three single model ensembles related to the FLOR model, one of which is an atmosphere-ocean coupled model, with the others being Sea Surface temperature (SST) driven global circulation models.

- Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment CORDEX-CORE South America (11 models with 0.44° resolution (SAM-44) and 3 models at 0.22° resolution (SAM-22)) multi-model ensemble[70,71], comprising 14 simulations resulting from pairings of Global Climate Models (GCMs) and Regional Climate Models (RCMs)). These simulations are composed of historical simulations up to 2005 and extended to the year 2100 using the RCP8.5 scenario.
- CMIP6. This consists of simulations from 13 participating models with varying resolutions. For more details on CMIP6, please see ref. 72. For all simulations, the period 1850 to 2015 is based on historical simulations, while the SSP5-8.5 scenario is used for the remainder of the 21st century.
- The FLOR[73] and AM2.5C360[74,75] climate models are developed at Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL). The FLOR model is an atmosphere-ocean coupled GCM with a resolution of 50 km for land and atmosphere and 1° for ocean and ice. Ten ensemble simulations from FLOR are analysed, which cover the period from 1860 to 2100 and include both the historical and RCP4.5 experiments driven by transient radiative forcings from CMIP5[76]. AM2.5C360 is an atmospheric GCM based on the FLOR model[75,77] with a horizontal resolution of 25 km. Three ensemble simulations of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP) experiment (1871–2100) are analysed. Radiative forcings are using historical values over 1871–2014 and RCP4.5 values after that. Simulations are initialised from three different pre-industrial conditions but forced by the same SSTs from HadISST1[78] after groupwise adjustments[74] over 1871–2020. SSTs between 2021 and 2100 are from the FLOR RCP4.5 experiment 10-ensemble mean values after bias correction.

Statistical methods

In this study, we analyse time series from Rio Grande do Sul of March–May maxima of 4-day accumulated precipitation where long records of observed data are available. Methods for observational and model analysis and for model evaluation and synthesis are used according to the World Weather Attribution (WWA) Protocol, described in ref. 69, with supporting details found in refs. 79,80.

The analysis steps include: (i) trend calculation from observations; (ii) model validation; (iii) multi-method multi-model attribution and (iv) synthesis of the attribution statement. We calculate the return periods, Probability Ratio (PR; the factor-change in the event's probability) and change in intensity (ΔI, the change in magnitude of the metric between the two reference states) of the event under study in order to compare the climate of now and the climate of the past, defined respectively by the GMST values of 2024 and of the preindustrial past (1850–1900, based on the Global Warming Index – https://www.globalwarmingindex.org/).

To statistically model changes in the likelihood and intensity of the event under study, we fit a nonstationary distribution with one or more covariates including GMST. In the rapid study, a generalised extreme value (GEV) distribution that scales with GMST and the El-Niño Southern Oscillation (ENSO) was used. The latter is represented by the relative Niño3.4 index, averaged over the December-February (DJF) period to capture the typical peak of the oscillation.

Here, the GEV, Gumbel and Gaussian distributions are fit to each observational time series, along with covariates of GMST only, and both GMST and the DJF Niño index. The statistical models are as follows:

The variable of interest, X, may be assumed to follow a GEV distribution in which the location and scale parameters vary with both GMST and ENSO:

$$X \sim GEV(\mu, \sigma, \xi | \mu_0,\ \sigma_0, \alpha, \beta,\ T,\ I) \tag{1}$$

where X denotes the variable of interest, rainy-season maximum 4-day precipitation; T is the smoothed GMST; I is the detrended Niño3.4 index; μ_0, σ_0 and ξ are the location, scale and shape parameters of the nonstationary distribution; and α, β are the trends due to GMST and ENSO, respectively. As a result, the location and scale of the distribution have a different value in each year, determined by both the GMST and Niño3.4 states. Maximum likelihood estimation is used to estimate the model parameters, with

$$\mu = \mu_0 exp\left(\frac{\alpha T + \beta I}{\mu_o}\right) \quad \text{and} \quad \sigma = \sigma_0 exp\left(\frac{\alpha T + \beta I}{\mu_o}\right) \tag{2}$$

Then, the Gumbel distribution is just this formulation with the shape parameter equal to zero, such that

$$X \sim GB(\mu, \sigma, \xi = 0 | \mu_0,\ \sigma_0, \alpha, \beta,\ T,\ I) \tag{3}$$

This assumption simplifies the model by reducing the number of fit parameters but requires testing.

Similarly, the variable of interest, X, may be assumed to follow a normal distribution in which the location and scale parameters vary with both GMST and ENSO:

$$X \sim N(\mu, \sigma | \mu_0,\ \sigma_0, \alpha, \beta,\ T,\ I) \tag{4}$$

where X denotes the variable of interest, rainy-season precipitation; T is the smoothed GMST; I is the detrended Niño3.4 index; μ_0 and σ_0 are the mean and variance parameters of the nonstationary distribution; and α, β are the trends due to GMST and ENSO, respectively. The location and scale parameters follow Eq. (2).

For all statistical models described above, the distribution is assumed to scale exponentially with the covariates, with the dispersion (the ratio between the standard deviation and the mean) remaining constant over time. This formulation for the scale and location parameters (the 'scale' assumption) reflects the Clausius-Clapeyron relation, which implies that precipitation scales exponentially with temperature[81,82], and so that precipitation will scale exponentially with the strength of the detrended Niño3.4 index. Other formulations are tested in Table 4, including the 'shift' assumption, in which the location parameter shifts linearly with GMST, and the combination of both assumptions, 'shift & scale'. The shift formulation is

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 14

Table 4 | AIC scores for statistical model fits to each rx4day time series with the 2024 event included (except for BR-DWGD) for different formulations and combinations of covariates

Dataset	Scale		Shift		Shift & Scale	
	GMST	GMST + Nino	GMST	GMST + Nino	GMST	GMST + Nino
CPC	424.24	**421.11**	423.86	**421.65**	425.01	423.81
CHIRPS	406.12	**405.694**	406.74	406.56	**405.69**	407.48
GPCC	400.32	**396.82**	400.93	**398.52**	400.31	398.62
MSWEP	422.52	**419.12**	422.89	**419.82**	421.76	420.57
BR -DWGD	551.96	**548.42**	552.57	**550.64**	553.86	551.91

Bold text shows the best 2 scores for each time series.

Table 5 | AIC scores for statistical model fits to each rx4day time series with the 2024 event included for different distributions and combinations of covariates

Dataset	GEV		Gaussian		Gumbel	
	GMST	GMST + Nino	GMST	GMST + Nino	GMST	GMST + Nino
CPC	424.24	**421.11**	428.50	421.84	422.26	**419.47**
CHIRPS	406.12	405.69	**405.20**	**404.60**	406.29	406.58
GPCC	400.32	396.82	401.60	**395.99**	398.82	**396.27**
MSWEP	422.52	419.12	423.95	**418.58**	421.22	**418.68**

Bold text shows the best 2 scores for each time series.

as follows:

$$\mu = \mu_0 + \alpha T + \beta I \quad \text{and} \quad \sigma = \sigma_0, \tag{5}$$

And the shift & scale formulation is given by:

$$\mu = \mu_0 + \alpha_\mu T + \beta_\mu I \quad \text{and} \quad \sigma = \sigma_0 exp(\alpha_\sigma T + \beta_\sigma I) \tag{6}$$

Under all of these models, the effects of GMST and the detrended Niño3.4 index are assumed to be independent of one another, so that the change in intensity due to GMST is unaffected by the change in intensity due to the ENSO phase. We note that this may not be the case in the real world, as the intensity and frequency of El Niño events may have been influenced by climate change[14]; however, by using a detrended Niño3.4 index, we aim to minimise the correlation between the two factors, and so do not expect the qualitative findings of this study to be affected by this simplifying assumption.

The Akaike Information Criterion (AIC) is used to determine the relative goodness of fit for different parametrisations, distributions and covariate combinations, while penalising more complex models to avoid overfitting. Tables 4, 5, 6 and 7 show the AIC scores for each time series with different distributions and covariates.

First, across almost all time series and distributions, fitting a statistical model using both GMST and this ENSO index as covariates gives an improved fit, according to the Akaike Information Criterion (AIC), than GMST alone, which holds true whether or not the event is included in the fit (Table 5 and 6). The addition of the PDO also does not improve the fit compared to either GMST alone or GMST and ENSO (Table 7). The

Table 6 | AIC scores for statistical model fits to each rx4day time series with the 2024 event excluded for different distributions and combinations of covariates

Dataset	GEV		Gaussian		Gumbel	
	GMST	GMST + Nino	GMST	GMST + Nino	GMST	GMST + Nino
CPC	401.53	**399.81**	400.35	**399.16**	403.80	402.79
CHIRPS	**388.28**	389.60	**386.99**	388.54	391.53	392.66
GPCC	375.13	**373.61**	374.93	**374.27**	381.20	380.32
MSWEP	401.27	399.76	**399.59**	**398.78**	404.20	403.26
BR-DWGD	551.96	**548.42**	553.20	**548.01**	551.32	549.71
Model ensemble						
CORDEX		**376.41**		**380.06**		
CMIP		**402.76**		**406.57**		
AM		**336.65**		**340.55**		
FLOR		**335.34**		**335.12**		

Bold text shows the best 2 scores for each time series.

Table 7 | AIC scores for statistical model fits to each rx4day time series with the 2024 event included (except for BR-DWGD) for different combinations of covariates

Dataset	Covariates		
	GMST	GMST + Nino	GMST + PDO
CPC	**424.24**	**421.11**	426.24
CHIRPS	**406.12**	**405.69**	407.93
GPCC	**400.32**	**396.82**	402.10
MSWEP	**422.52**	**419.12**	424.50
BR -DWGD	561.91	**559.84**	**561.89**

Bold text shows the best 2 scores for each time series.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 15

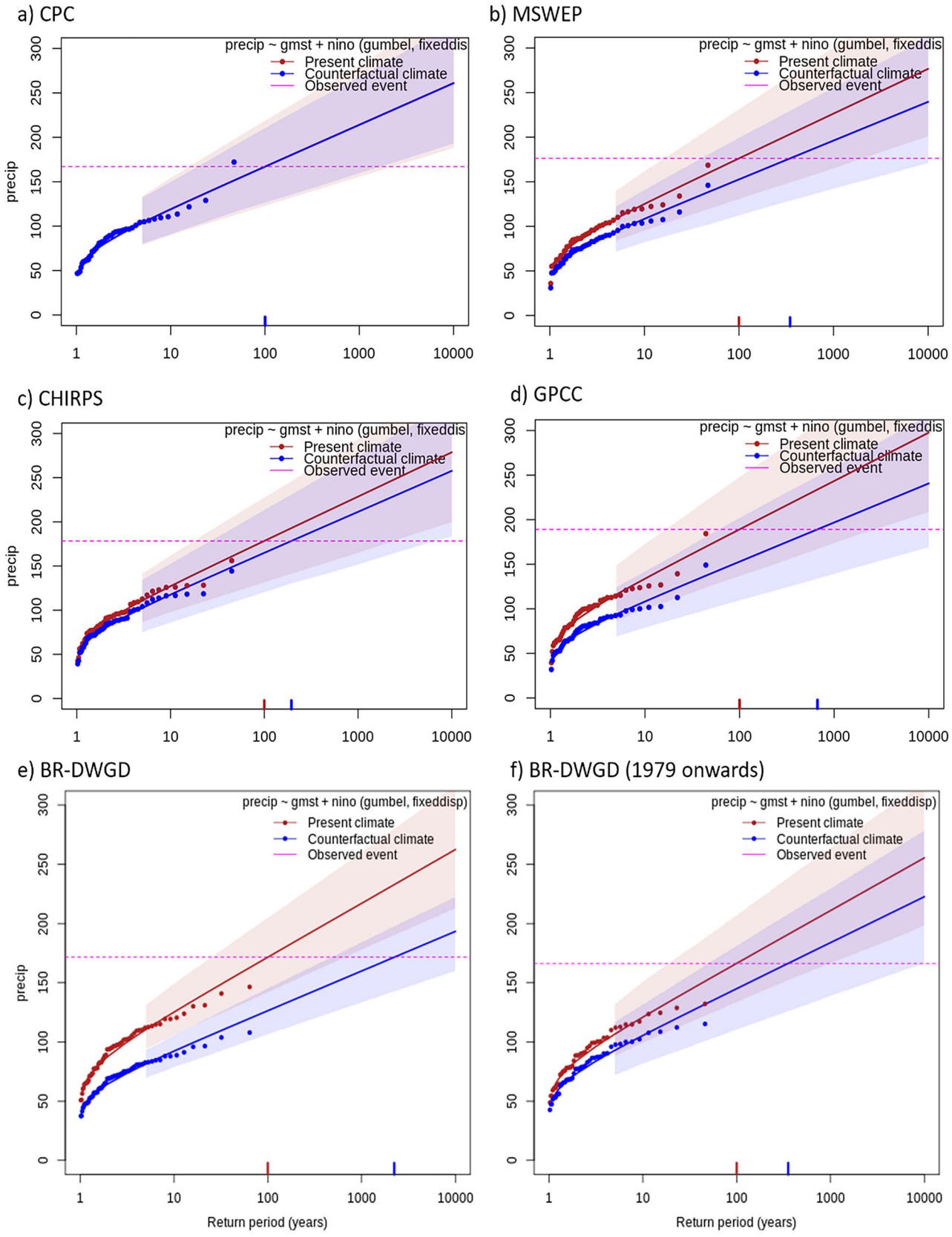


Fig. 9 | Return period plots for the 4-day event for five observational and reanalysis datasets used in this study. a CPC, **b** MSWEP, **c** CHIRPS, **d** GPCC, **e** BR-DWGD, **f** BR-DWGD (from 1979–onwards), in the current climate and scaled to a climate without anthropogenic warming, modelled using a Gumbel distribution. The observed event is shown by the highest red dot and the purple line labelled as the 'observed event' represents the 1 in 100-year event used in this analysis.

influence of the current (DJF) El Niño is therefore considered throughout this study.

Second, the various distributions perform differently depending on whether or not the event is included in the analysis, and for models and observations/reanalysis. When the event is included in the time series (Table 5), the Gaussian distribution performs the best, with GEV and Gumbel distributions similarly ranked overall. Inspecting the respective return level plots visually helps to highlight its performance across different regions of the distribution, which clearly shows that while the Gumbel distribution fits more of the data well, it

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 16

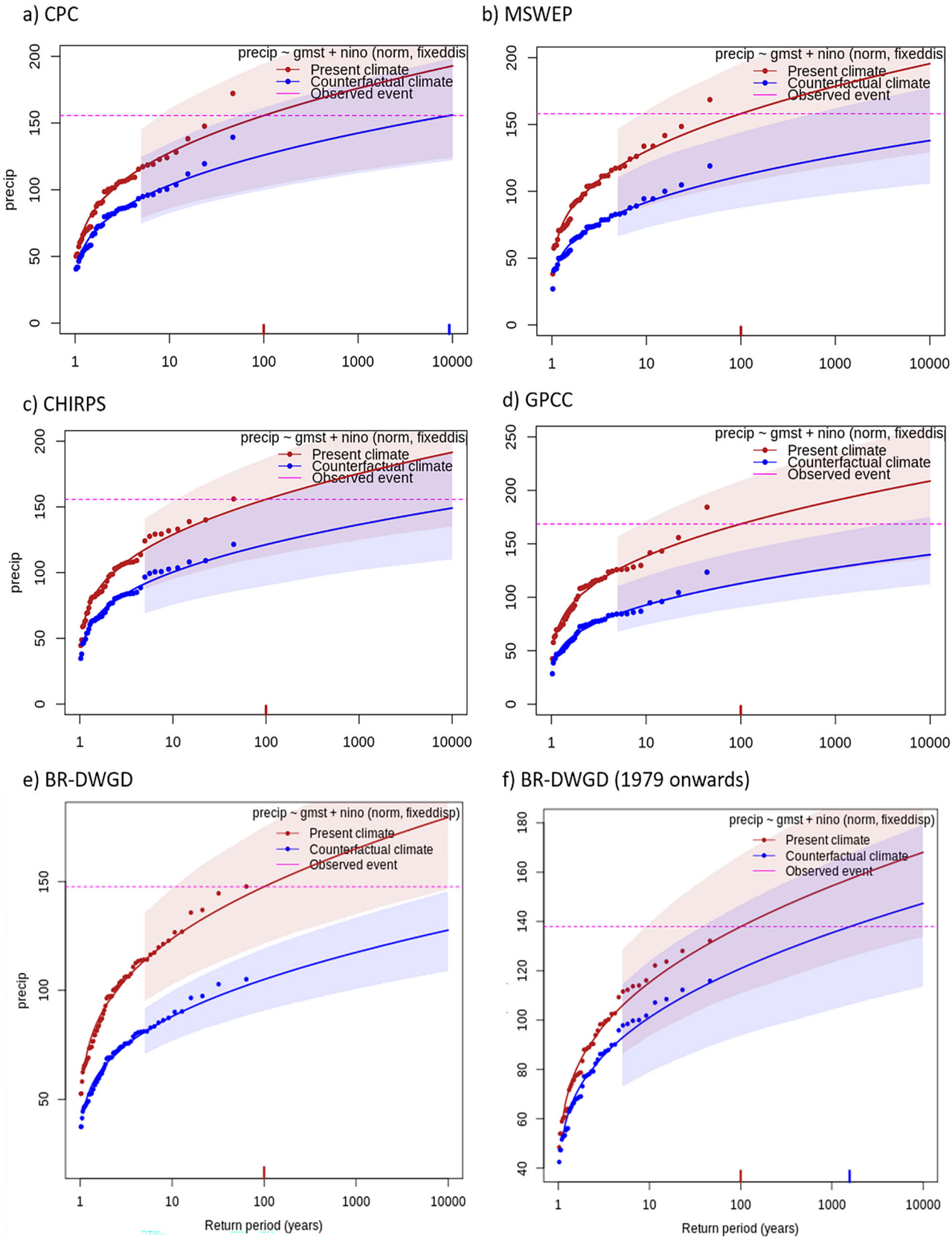


Fig. 10 | Return period plots for the 4-day event for five observational and reanalysis datasets used in this study. a CPC, **b** MSWEP, **c** CHIRPS, **d** GPCC, **e** BR-DWGD, **f** BR-DWGD (from 1979–onwards), in the current climate and scaled to a climate without anthropogenic warming, modelled using a Gaussian distribution. The observed event is shown by the highest red dot and the purple line labelled as the 'observed event' represents the 1 in 100-year event used in this analysis.

performs very poorly at the tail of the distribution where the event lies (Fig. 9), while the Gaussian and GEV distributions capture this region more closely (Fig. 5 and 10). This is confirmed by repeating the same fit assessment but without the 2024 event. When the event is removed, the Gumbel distribution performs worst among the distributions by a substantial margin (Table 6) and is therefore not used in the analysis. Meanwhile, the Gaussian distribution performs best overall for observational and reanalysis datasets, but the GEV distribution performs better for the model data, and both are reasonably close (Table 6). As result, the analysis in the main body of the study uses the

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 17

GEV, while the results of the Gaussian are shown in the supplementary material (Tables S3 and 4). This helps to test how sensitive the results (both qualitative and quantitative) are to the choice of statistical model.

The multi-method multi-model attribution step of the WWA protocol involves estimating, for each climate model, the effective return level of a 1-in-n-year event under the current climate state and estimating the expected change in likelihood and intensity of such an event after a specified change in the covariates. Because the smoothed GMST is generally monotonically increasing, the standard WWA approach is simply to take the model's 2024 GMST as a covariate and to estimate the expected magnitude of an n-year event. However, the factual climate in this study is defined by the 2024 GMST and by the mean of the detrended DJF Niño3.4 index. During the attribution step, the detrended Niño3.4 index derived from the climate model is standardised so that the subset from 1990–2020 has mean 0 and variance 1; the 'factual' climate is then defined as having the model's 2024 GMST and the 2024 observed value of the detrended Niño3.4 index, standardised in the same way. This removes any potential biases in the results due to differences between the amplitude of the modelled Niño3.4 index and that observed.

Multi-model attribution

In this section, we show the results of the model evaluation for the study region of Rio Grande do Sul and surrounding region of southeastern South America. The climate models are evaluated against the observations in their ability to capture:

1. Seasonal cycles: we qualitatively compare the seasonal cycles based on model outputs against observationally-based cycles. We discard the models that exhibit multi-modality and/or ill-defined peaks in their seasonal cycles (see appendix Figs. S7–S9 for seasonal cycles).
2. Spatial patterns: we qualitatively compare the spatial patterns based on model outputs against observationally-based patterns. Models that do not match the observations in terms of the large-scale precipitation patterns are excluded (see Appendix Figs. S4–S6 for spatial patterns).
3. Parameters of the fitted GEV models (dispersion and shape parameters). We discard the model if the model and observation parameter ranges do not overlap.
4. Correlation between March-May precipitation extremes and the detrended Niño3.4 index. We discard the model if the model and observation parameter ranges do not overlap.

The models are labelled as 'good', 'reasonable', or 'bad' based on their performances in terms of the four criteria discussed above. We evaluate 13 models from CORDEX and 11 models from CMIP6, as well as 3 runs of the AM2 model and 10 runs of the FLOR model.

All CMIP6 models, two out of three AM2 and seven out of ten FLOR models ensemble members, and all except for two CORDEX models pass the evaluation criteria as 'reasonable', with no models classified as 'good' (highlighted in yellow in Table S2). All models were found to be 'good' or 'reasonable' at reproducing the observed Niño3.4 correlations (not shown in Table S2).

The synthesis procedure used here has been peer-reviewed[27] and works as follows. Before combining the different lines of evidence from observational and reanalysis datasets and climate models into a synthesised assessment, various sources of error are taken into consideration. First, a representation error is added (in quadrature) to the observations, to account for the difference between observations-based datasets that cannot be explained by natural variability. This is shown in these figures as white boxes around the light blue bars. The dark blue bar shows the average over the observation-based products. Next, a term to account for inter-model spread is added (in quadrature) to the natural variability of the models. This is shown in the figures as white boxes around the light red bars. The dark red bar shows the model average, consisting of a weighted mean using the (uncorrelated) uncertainties due to natural variability plus the term representing inter-model spread (i.e., the inverse square of the white bars). For the AM2 and FLOR ensembles, these individual ensemble members were first synthesised (using the same method) into a single result before being included in the wider synthesis.

For the final synthesis, results from observation-based products and models (Table 6) are combined into a single result in two ways. Firstly, we neglect common model uncertainties beyond the inter-model spread that is depicted by the model average and compute the weighted average of models (dark red bar) and observations (dark blue bar): this is indicated by the magenta bar. As, due to common model uncertainties, model uncertainty can be larger than the inter-model spread, secondly, we also show the more conservative estimate of an unweighted, direct average of observations (dark red bar) and models (dark blue bar) contributing 50% each, indicated by the white box around the magenta bar in the synthesis figures.

Data availability

The data used for this analysis and to produce all figures is available publicly at https://github.com/BenJClarke18/Brazil_floods_2024 and https://zenodo.org/records/17855714.

Code availability

The code used for this analysis and to produce all figures is available publicly at https://github.com/BenJClarke18/Brazil_floods_2024 and https://zenodo.org/records/17855714. General underlying code for conducting probabilistic event attribution analysis is also available at https://github.com/WorldWeatherAttribution/rwwa.

Received: 1 August 2025; Accepted: 16 December 2025;
Published online: 10 January 2026

References

1. Porto Alegre experiences its rainiest start to May in 60 years, according to Climatempo. G1 https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/05/12/porto-alegre-tem-inicio-de-maio-mais-chuvoso-em-115-anos-diz-climatempo.ghtml (2024).
2. Brazil: Rio Grande do Sul Flood Emergency: Snapshot #4 As of 07 July 2024 - Brazil | ReliefWeb. https://reliefweb.int/report/brazil/brazil-rio-grande-do-sul-flood-emergency-snapshot-4-07-july-2024 (2024).
3. Trancoso, R., Flores, B. M. & Chapman, S. Deadlier natural disasters—a warning from Brazil's 2024 floods. *Environ. Res. Lett.* **20**, 041001 (2025).
4. Maps. https://erccportal.jrc.ec.europa.eu/ECHO-Products/Maps#/maps/4868 (2024).
5. Velleda, L. Poor neighborhoods were the most affected by the flooding in the capital and metropolitan region. *Sul 21* https://sul21.com.br/noticias/geral/2024/05/bairros-pobres-foram-os-mais-atingidos-pela-enchente-na-capital-e-regiao-metropolitana/ (2024).
6. Taschetto, A. S. et al. ENSO atmospheric teleconnections. In *El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate* 309–335, https://doi.org/10.1002/9781119548164.ch14 (American Geophysical Union (AGU), 2020).
7. Teixeira, M. S. & Satyamurty, P. Dynamical and Synoptic characteristics of heavy rainfall episodes in Southern Brazil. https://doi.org/10.1175/MWR3302.1 (2007).
8. Teixeira, M. da S. & Satyamurty, P. Trends in the frequency of intense precipitation events in Southern and Southeastern Brazil during 1960–2004. https://doi.org/10.1175/2011JCLI3511.1(2011).
9. Luiz-Silva, W. An overview of precipitation climatology in Brazil: space-time variability of frequency and intensity associated with atmospheric systems. *Hydrol. Sci. J.* **66**, 289–308 (2021). Oscar-Júnior, Antonio Carlos, Cavalcanti, Iracema Fonseca Albuquerque & and Treistman, F.
10. Carvalho, L. M. V., Jones, C. & Liebmann, B. The South Atlantic Convergence Zone: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. https://

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 18

journals.ametsoc.org/view/journals/clim/17/1/1520-0442_2004_017_0088_tsaczi_2.0.co_2.xml (2004).
11. Marengo, J. A., Soares, W. R., Saulo, C. & Nicolini, M. Climatology of the low-level Jet East of the Andes as derived from the NCEP–NCAR reanalyses: characteristics and temporal variability. https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/17/12/1520-0442_2004_017_2261_cotlje_2.0.co_2.xml (2004).
12. Fleischmann et al. The great 1983 floods in South American large rivers: a continental hydrological modelling approach. *Hydrol. Sci. J.* **65**, 1358–1373 (2020).
13. Ávila, A., Justino, F., Wilson, A., Bromwich, D. & Amorim, M. Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil. *Environ. Res. Lett.* **11**, 114029 (2016).
14. Cai, W. et al. Changing El Niño–Southern Oscillation in a warming climate. *Nat. Rev. Earth Environ.* **2**, 628–644 (2021).
15. Chagas, V. B., Chaffe, P. L., & Blöschl, G. Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. *Nat. Commun*. **13**, 5136. https://www.nature.com/articles/s41467-022-32580-x (2022).
16. Fernandes, L. G. & Rodrigues, R. R. Changes in the patterns of extreme rainfall events in southern Brazil. *Int. J. Climatol.* **38**, 1337–1352 (2018).
17. *02 South Brazil Floods* https://www.climameter.org/20240502-south-brazil-floods ClimaMeter—2024/05/.
18. Over the last three decades, the South has recorded an increase of up to 30% in average annual rainfall. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/nas-ultimas-tres-decadas-sul-registra-aumento-de-ate-30-na-precipitacao-media-anual.
19. Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (Cambridge University Press, https://doi.org/10.1017/9781009157896 (2023).
20. Zaninelli, P. G., Menéndez, C. G., Falco, M., López-Franca, N. & Carril, A. F. Future hydroclimatological changes in South America based on an ensemble of regional climate models. *Clim. Dyn.* **52**, 819–830 (2019).
21. Jeferson de Medeiros, F., Prestrelo de Oliveira, C. & Avila-Diaz, A. Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: from CMIP3 to CMIP6. *Weather Clim. Extrem.* **38**, 100511 (2022).
22. Almazroui, M. et al. Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. *Earth Syst. Environ.* **5**, 155–183 (2021).
23. Alves, L. M., Chadwick, R., Moise, A., Brown, J. & Marengo, J. A. Assessment of rainfall variability and future change in Brazil across multiple timescales. *Int. J. Climatol.* **41**, E1875–E1888 (2021).
24. Climate change, El Niño and infrastructure failures behind massive floods in southern Brazil – World Weather Attribution. *World Weather Attribution* https://www.worldweatherattribution.org/climate-change-made-the-floods-in-southern-brazil-twice-as-likely/ (2024).
25. Environment, U. N. Emissions Gap Report 2024 | UNEP - UN Environment Programme. https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2024 (2024).
26. Newman, M. et al. The Pacific Decadal Oscillation, Revisited. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0508.1 (2016).
27. Otto, F. E. L. et al. Formally combining different lines of evidence in extreme-event attribution. *Adv. Stat. Climatol. Meteorol. Oceanogr.* **10**, 159–171 (2024).
28. Montini, T. L., Jones, C. & Carvalho, L. M. V. The South American low-level jet: a new climatology, variability, and changes. *J. Geophys. Res. Atmospheres* **124**, 1200–1218 (2019).
29. Torres-Alavez, J. A. et al. Future projections in the climatology of global low-level jets from CORDEX-CORE simulations. *Clim. Dyn.* **57**, 1551–1569 (2021).
30. Reboita, M. S. et al. Future projections of extreme precipitation climate indices over South America based on CORDEX-CORE multimodel ensemble. *Atmosphere* **13**, 1463 (2022).
31. Blázquez, J. & Silvina, A. S. Multiscale precipitation variability and extremes over South America: analysis of future changes from a set of CORDEX regional climate model simulations. *Clim. Dyn.* **55**, 2089–2106 (2020).
32. Shepherd, T. G. et al. Storylines: an alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change. *Clim. Change* **151**, 555–571 (2018).
33. Mastrandrea, M. D. et al. The IPCC AR5 guidance note on consistent treatment of uncertainties: a common approach across the working groups. *Clim. Change* **108**, 675 (2011).
34. Redator. Núcleo Porto Alegre analisa os impactos das enchentes na população pobre e negra do Rio Grande do Sul. *Observatório das Metrópoles* https://www.observatoriodasmetropoles.net.br/nucleo-porto-alegre-analisa-os-impactos-das-enchentes-na-populacao-pobre-e-negra-do-rio-grande-do-sul/ (2024).
35. Floods have affected 3000 health care units in Rio Grande do Sul-Brazil | ReliefWeb. *ReliefWeb* https://reliefweb.int/report/brazil/floods-have-affected-3000-health-care-units-rio-grande-do-sul (2024).
36. Rains in Rio Grande do Sul have affected 8000 indigenous people. *Agência Brasil* https://agenciabrasil.ebc.com.br/en/geral/noticia/2024-05/rains-rio-grande-do-sul-have-affected-8000-indigenous-people (2024).
37. Dourado, M. Floods have already affected more than 80 indigenous communities in Rio Grande do Sul; find out how to help. | CIMI. https://cimi.org.br/2024/05/indigenascheiars/ (2024).
38. ABRHidro - ANAIS - Preliminary Application of the MGB-IPH Hydrological Model for the Analysis of the Extreme Flood Event of 1941 in the State of Rio Grande do Sul. https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=3761 (2018).
39. Possa, T. M., Collischonn, W., Jardim, P. F. & Fan, F. M. Hydrological-hydrodynamic simulation and analysis of the possible influence of the wind in the extraordinary flood of 1941 in Porto Alegre. *RBRH* **27**, e29 (2022).
40. Allasia, D. G., Tassi, R., Bemfica, D. & Goldenfum, J. A. Decreasing flood risk perception in Porto Alegre – Brazil and its influence on water resource management decisions. In *Proceedings of IAHS.* vol. 370 189–192 (Copernicus GmbH, 2015).
41. Brazil, D.-L. City Hall's responsibility for the Porto Alegre catastrophe. *De-Linking Brazil* https://bmier.substack.com/p/city-halls-responsibility-for-the (2024).
42. Prizibisczki, C. Rio Grande do Sul has lost 22% of its vegetation cover in recent decades. *((o))eco* https://oeco.org.br/reportagens/rio-grande-do-sul-perdeu-22-de-sua-cobertura-vegetal-nas-ultimas-decadas/ (2024).
43. Oliveira, E. Rain in Rio Grande do Sul: what do the muddy waters that sweep everything away signal? *((o))eco* https://oeco.org.br/reportagens/chuvas-no-rio-grande-do-sul-o-que-as-aguas-barrentas-que-tudo-arrastam-sinalizam/ (2024).
44. Etchelar, C. B., Gruber, N. L. S. & Brenner, V. C. The impacts caused by drainage channels in wetlands of the Gravataí River. – Rio Grande do Sul - Brasil e na praia da Coronilha – Rocha – Uruguai. *Seven Ed*. https://sevenpublicacoes.com.br/index.php/editora/article/view/3626 (2023).
45. Temporais No RS: Civil Defense issues 'express guidance' for evacuation of at-risk areas in the Taquari Valley. *G1* https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/05/01/temporais-no-rs-defesa-civil-vale-do-taquari.ghtml (2024).

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 19

46. Rio Grande do Sul has issued a warning for heavy rain, lightning, and the risk of flooding, according to Civil Defense. *G1* https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/04/22/rs-tem-alerta-para-chuvas-fortes-descargas-eletricas-e-risco-de-alagamentos-diz-defesa-civil.ghtml (2024).
47. Sornette, D. & Ouillon, G. Dragon-kings: mechanisms, statistical methods and empirical evidence. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **205**, 1–26 (2012).
48. Tragedy in Rio Grande do Sul: difference between flood, inundation, and flooding. *Brasil Escola* https://brasilescola.uol.com.br/noticias/tragedia-no-rs-entenda-a-diferenca-entre-enchente-inundacao-e-alagamento/3131313.html.
49. Floods in Rio Grande do Sul: what caused the 1941 flood in Porto Alegre—and why it is not an argument to deny climate change. *BBC News Brasil* https://www.bbc.com/portuguese/articles/cv27272zd79o (2024).
50. Diplomat, T. W. Historic floods in the Brazilian state of Rio Grande do Sul. *The Water Diplomat* https://www.waterdiplomat.org/story/2024/05/historic-floods-brazilian-state-rio-grande-do-sul (2024).
51. Stocks, C. Dam of 14 de Julho power plant in Brazil partially collapses. *International Water Power* https://www.waterpowermagazine.com/news/dam-of-14-de-julho-power-plant-in-brazil-partially-collapses-fatalities-reported-11737530/ (2024).
52. Death toll from southern Brazil rainfall rises to 78 with many missing | Floods News | Al Jazeera. *Al Jazeera* https://www.aljazeera.com/gallery/2024/5/6/death-toll-from-southern-brazil-rainfall-rises-with-many-still-missing.
53. 'Desperate' rescues under way as Brazil floods kill 90, displace thousands | Floods News | Al Jazeera. *Al Jazeera* https://www.aljazeera.com/news/2024/5/7/desperate-rescues-under-way-as-brazil-floods-kill-90-displace-thousands (2024).
54. Fato, B. de. Death toll from floods in Rio Grande do Sul rises to 90, affecting more than 1 million people. *Peoples Dispatch* https://peoplesdispatch.org/2024/05/07/death-toll-from-floods-in-rio-grande-do-sul-rises-to-90-affecting-more-than-1-million-people/ (2024).
55. Egas, H. M. et al. Comprehensive inventory and initial assessment of landslides triggered by autumn 2024 rainfall in Rio Grande do Sul, Brazil. *Landslides* **22**, 579–589 (2025).
56. Brazil, Porto Alegre–Salgado Filho International Airport reopened today. https://www.avionews.it/item/1260689-brazil-porto-alegre-salgado-filho-international-airport-reopened-today.html (2024).
57. Floods in Brazil's Rio Grande do Sul state disrupt supply chain. *S&P Global Market Intelligence* https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/news-insights/research/floods-in-brazils-rio-grande-do-sul-state-disrupt-supply-chain (2024).
58. Brazil: Unprecedented floods in Rio Grande do Sul threaten Brazil's agricultural output (May 16, 2024) - Brazil | ReliefWeb. https://reliefweb.int/report/brazil/brazil-unprecedented-floods-rio-grande-do-sul-threaten-brazils-agricultural-output-may-16-2024 (2024).
59. 2024 Rio Grande do Sul Brazil Floods. *Center for Disaster Philanthropy* https://disasterphilanthropy.org/disasters/2024-rio-grande-do-sul-brazil-floods/ (2024).
60. MapBiomas Brasil. https://brasil.mapbiomas.org/en/2023/10/20/em-38-anos-o-brasil-perdeu-15-de-suas-florestas-naturais/.
61. Martinbiancho, G. K. et al. Preliminary application of the MGB-IPH hydrological model for the analysis of the extreme flood event in 1941 in the state of Rio Grande do Sul.
62. Beck, H. E. et al. MSWEP V2 Global 3-Hourly 0.1° Precipitation: Methodology and Quantitative Assessment. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **100**, 473–500 (2019).
63. Funk, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci. Data* **2**, 150066 (2015).
64. Markus, Z. et al. GPCC Full Data Daily Version 2022 at 1.0°: Daily Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data: Globally Gridded Daily Totals. approx. 25 MB per gzip file Global Precipitation Climatology Centre (GPCC, http://gpcc.dwd.de/) at Deutscher Wetterdienst https://doi.org/10.5676/DWD_GPCC/FD_D_V2022_100 (2022).
65. Xavier, A. C., Scanlon, B. R., King, C. W. & Alves, A. I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). *Int. J. Climatol.* **42**, 8390–8404 (2022).
66. Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M. & Lo, K. Global surface temperature change. *Rev. Geophys*. **48** (2010).
67. Lenssen, N. J. L. et al. Improvements in the GISTEMP Uncertainty Model. *J. Geophys. Res. Atmos.* **124**, 6307–6326 (2019).
68. van Oldenborgh, G. J. et al. Defining El Niño indices in a warming climate. *Environ. Res. Lett.* **16**, 044003 (2021).
69. Philip, S. et al. A protocol for probabilistic extreme event attribution analyses. *Adv. Stat. Climatol. Meteorol. Oceanogr.* **6**, 177–203 (2020).
70. Giorgi, F., Coppola, E., Teichmann, C. & Jacob, D. Editorial for the CORDEX-CORE Experiment I Special Issue. *Clim. Dyn.* **57**, 1265–1268 (2021).
71. Giorgi, F. Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **40**, 467–490 (2015). & Jr, W. J. G.
72. Eyring, V. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.* **9**, 1937–1958 (2016).
73. Vecchi, G. A. et al. On the seasonal forecasting of regional tropical cyclone activity. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00158.1 (2014).
74. Chan, D., Vecchi, G. A., Yang, W. & Huybers, P. Improved simulation of 19th- and 20th-century North Atlantic hurricane frequency after correcting historical sea surface temperatures. *Sci. Adv*. **7**, (2021).
75. Yang, W., Hsieh, T.-L. & Vecchi, G. A. Hurricane annual cycle controlled by both seeds and genesis probability. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* **118**, e2108397118 (2021).
76. Taylor, K. E., Stouffer, R. J. & Meehl, G. A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1 (2012).
77. Delworth, T. L. et al. Simulated climate and climate change in the GFDL CM2.5 high-resolution coupled climate model. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00316.1 (2012).
78. Rayner, N. A. et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res. Atmos.* **108** (2003).
79. van Oldenborgh, G. J. et al. Pathways and pitfalls in extreme event attribution. *Clim. Change* **166**, 13 (2021).
80. Ciavarella, A. et al. Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence. *Clim. Change* **166**, 9 (2021).
81. Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M. & Parsons, D. B. The changing character of precipitation. https://doi.org/10.1175/BAMS-84-9-1205 (2003).
82. O'Gorman, P. A. & Schneider, T. The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21st-century climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **106**, 14773–14777 (2009).
83. Stein, A. F. et al. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **96**, 2059–2077 (2015).
84. Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M. & Francis, R. C. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull Am. Meteor. Soc.* **78**, 1069–1079 (1997).

Acknowledgements

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 101003469.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO9, Página 20

Author contributions

B.C., C.B., R.R., M.Z., L.A., and F.O. wrote the hazard sections of the manuscript. M.V., K.I., J.B., and M.M. collated the impacts and wrote/reviewed the vulnerability and exposure context. B.C. produced the figures, conducted data analysis and led all revisions. C.B and M.Z. provided data analysis support, and W.Y. provided additional model data. All authors, including R.H., I.P., G.V., J.K., S.P., and S.K., were involved in study conception and reviewing the manuscript.

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Additional information

Supplementary information The online version contains supplementary material available at https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8.

Correspondence and requests for materials should be addressed to Ben Clarke.

Reprints and permissions information is available at http://www.nature.com/reprints

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.

© The Author(s) 2026

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO10, Página 1

TRADUTOR PÚBLICO JURAMENTADO
Sworn Public Translator
Av. Almirante Barroso Nº 63 - Sala 1905
Registro Jucerja nº 143
Tels.:2 240-6427/2240-1707 - Fax: 2240-6477 Cel: (21)999691992
E-mail: anelisepac@gmail.com
Rio de Janeiro - Brasil - CEP 20.036-900

Eu, abaixo assinada, tradutora pública juramentada e intérprete comercial nesta cidade do Rio de Janeiro, certifico que me foi apresentado um documento em INGLÊS, o qual passo a traduzir para o vernáculo, em razão do meu ofício, como segue:

TRADUÇÃO N° 0625/2026

NPJ | Perigos Naturais

Artigo

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

Mudanças climáticas e El Niño por trás de precipitações extremas que levaram a grandes enchentes no sul do Brasil em 2024

Verifique atualizações

Ben Clarke[1] ✉, Clair Barnes[1], Regina Rodrigues[2], Mariam Zachariah[1], Lincoln Muniz Alves[3], Rein Haarsma[4], Izidine Pinto[4], Wenchang Yang 5, Maja Vahlberg[6], Gabriel Vecchi[5], Karina Izquierdo[6], Joyce Kimutai[1], Sjoukje Philip[4], Sarah Kew[4], João Biehl 7, Miqueias Mugge[8] & Friederike E. L. Otto[1]

Em abril–maio de 2024, enchentes sem precedentes no Rio Grande do Sul deslocaram cerca de 600.000 pessoas e causaram mais de 180 mortos. Este estudo analisa o papel das mudanças climáticas antropogênicas e das condições de El Niño anteriores nas precipitações extremas, utilizando uma atribuição probabilística de eventos. Esse evento foi raro mesmo no clima de 2024, com um período de retorno superior a 100 anos. Com o aquecimento global de 1,2 °C, tal evento tornou-se aproximadamente 2 (0,06–4200) vezes mais provável, ou equivalentemente 12% (−13 a +43%) mais intenso. O recente evento El Niño também dobrou aproximadamente (0,7–37 vezes) a probabilidade de tal evento em relação a um ano neutro. Em qualquer desastre, o contexto de vulnerabilidade e exposição desempenha um papel crucial na transformação do risco meteorológico em impactos, ressaltando a necessidade de medidas de adaptação equitativas para quebrar o ciclo de risco e a desigualdade no contexto do aquecimento climático.

Entre 24 de abril e 4 de maio, o estado mais ao sul do Brasil, o Rio Grande do Sul, registrou uma precipitação persistente e extraordinária, equivalente a três meses médios de chuva em um período de duas semanas, com uma média de acumulação de 420 mm. Essa precipitação recorde (Fig. 1) levou a níveis historicamente altos dos rios, colocando 12 barragens sob pressão, e causou uma extensa inundação que afetou 90% dos municípios do estado. As enchentes ocorreram em grande parte do estado, mas foram particularmente intensas na capital Porto Alegre, onde este foi o início de maio mais chuvoso em 63 anos[1]. Esses desastres de enchentes constituem um dos desastres humanitários mais significativos vividos no Brasil. No total, 2,3 milhões de pessoas foram afetadas [2], com 600.000 pessoas deslocadas e mais de 180 fatalidades causadas [3,4]. As violentos enchentes causaram perdas, danos e interrupções, impactando pessoas de todos os grupos demográficos em aproximadamente 11 milhões de habitantes do Rio Grande do Sul, incluindo comunidades de renda mais alta [5]. No entanto, a exposição diferenciada, a vulnerabilidade e a capacidade de enfrentamento tornaram certos grupos desproporcionalmente mais impactados.

A precipitação extrema observada na maior parte do estado (Fig. 1) foi impulsionada pela persistente "alta do Atlântico Sul", uma região de alta pressão sobre o leste do Brasil e o Atlântico Sul (Fig. 2). Isso intensificou os ventos alísios, facilitando o fluxo de umidade leste do Oceano Atlântico tropical para a região central do Brasil, seguido por um aumento de umidade transportada do centro do Brasil em direção ao Rio Grande do Sul através do Jato de Nível Inferior Sul-Americano (SALLJ). As massas de ar viajavam por uma rota persistente, tendo se originado da região central do Brasil alguns dias antes (Fig. 3a). O persistente sistema de alta pressão que se desenvolveu sobre o Oceano Atlântico sul atuou como um sistema de bloqueio do fluxo oeste. Isso resultou em altas precipitações que se acumularam ao longo de vários dias e levaram a ondas de enchentes sem precedentes sobre o Rio Grande do Sul (Figs. 1, 3b).

As tendências e a variabilidade da precipitação no sul do Brasil (abrangendo os estados de Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul) são influenciadas por uma combinação dos padrões sazonais (que afetam amplamente o momento da precipitação), fenômenos climáticos interanuais como a Oscilação do Sul do El Niño (ENSO)[6], variabilidade em escala decadal e mudanças climáticas. Esta região é caracterizada por um clima subtropical (transição entre clima tropical e temperado) com um suprimento contínuo de umidade proveniente do Oceano Atlântico e da região amazônica. Sistemas convectivos em mesoescala são os sistemas meteorológicos mais importantes que produzem chuva nesta região, principalmente durante a primavera/verão (de setembro a fevereiro), enquanto frentes frias são responsáveis pela precipitação durante o outono/inverno (de março a agosto). Por essa razão, a precipitação é distribuída uniformemente ao longo do ano[8],

[1]Centro de Política Ambiental, Imperial College, Londres, Reino Unido. [2]Univ. Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil. [3]Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
(INPE), São Paulo, Brasil. [4] Instituto Meteorológico Real dos Países Baixos (KNMI), De Bilt, Holanda. [5]Departamento de Geociências, Universidade de Princeton, Princeton, NJ, EUA. [6]Centro Climático Cruz Vermelha do Crescente Vermelho, Haia, Holanda. [7]Departamento de Antropologia e Brazil LAB, Universidade de Princeton, Princeton, NJ, EUA. [8]Brazil LAB, Universidade de Princeton, Princeton, NJ, EUA. ✉ E-mail: b.clarke@imperial.ac.uk

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

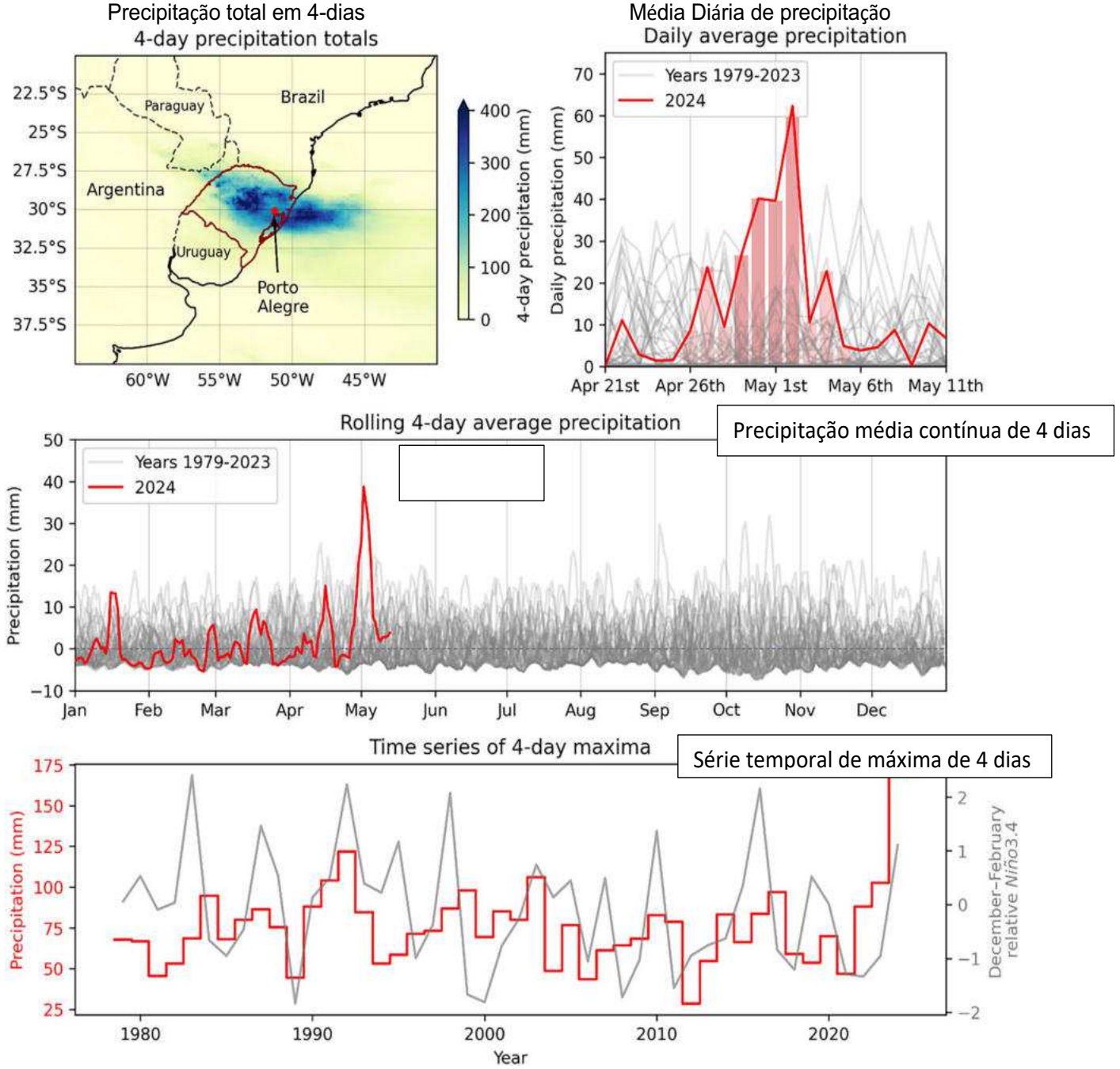


Fig. 1 | Precipitação acumulada sobre o Rio Grande do Sul, o estado mais ao sul do Brasil, no final de abril e início de maio de 2024 (dados do MSWEP). Canto superior esquerdo: Mapa dos acúmulos durante o período de 4 dias mais chuvoso. Rio Grande do Sul é destacado em vermelho escuro. Canto superior direito: A precipitação diária média foi sobre o Rio Grande do Sul em 2024 (vermelho) e em todos os outros anos no registro (cinza). As barras vermelhas escuras (claras) indicam a janela de 4 dias (10 dias) em que a precipitação foi mais intensa. Meio: Anomalias das acumulações móveis de precipitação em 4 dias sobre o Rio Grande do Sul em 2024 (vermelho) versus a climatologia de 1990-2020 e em relação a todos os outros anos a partir de 1979 no registro (cinza). Base: série temporal da precipitação máxima de 4 dias de março-maio sobre o Rio Grande do Sul, e o índice relativo Niño3,4 de dezembro-fevereiro (DJF) (veja Métodos), com valor de 1,107 no DJF 2023/24.

tornando-a a segunda região mais chuvosa do país, ficando atrás apenas da floresta amazônica no noroeste do Brasil[9].

No final de 2023 e início de 2024, ENSO estava em sua fase mais positiva (El Niño) (Fig. 1). O centro subtropical do Atlântico Sul normalmente se move para oeste sobre o centro do Brasil durante o outono/inverno (para leste sobre o Atlântico Sul durante a primavera/verão). No entanto, durante esse evento, o padrão do trem de ondas da América do Sul (PSA) relacionado ao El Niño amplificou o centro de alta pressão sobre o centro do Brasil [10], tornando-o maior e mais persistente ali. Típico dos episódios de El Niño, isso causa subsidência anômala na região e enfraquece a Zona de Convergência do Atlântico Sul, uma faixa convectiva no verão austral caracterizada pela intensa convergência de ar quente e úmido que se estende da Bacia Amazônica até o subtropical Atlântico Sul[11]. Ao mesmo tempo, os ventos associados ao centro anômalo de alta pressão aprimora o SALLJ, um fluxo climatológico noroeste a leste dos Andes que transporta umidade das latitudes tropicais para o sudeste da América do Sul [12]. Além disso, durante esse evento, o Atlântico tropical estava anormalmente quente, fornecendo mais umidade para o SALLJ.

É notável que, embora o padrão de PSA seja mais forte durante a primavera e o verão, podem ocorrer precipitações intensas e grandes temperaturas durante o outono e o inverno, quando os sistemas frontais

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO10, Página 4

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

começam a vir de latitudes mais altas e ficam presos sobre a região, bloqueados pelo persistente centro de alta pressão sobre o centro do Brasil. Assim, as enchentes mais impactantes no sul do Brasil associados ao El Niño tendem a ocorrer durante o outono e início do inverno, como as enchentes do rio Itajaí Açu em julho de 1983. De fato, outro fator importante que contribuiu para a forte chuva em maio de 2024 foi a proximidade do jato do fluxo trazendo mais instabilidades (sistemas frontais). Essas frentes foram então bloqueadas pelo centro de alta pressão sobre o centro do Brasil, levando a um período prolongado de vários dias em que precipitações extremas se acumularam sobre o sul do país.

Embora esse padrão seja consistente com as típicas tele conexões e impactos do ENSO, fases de El Niño mais fortes no passado não resultaram em eventos de precipitação tão intensos (Fig. 1), e vários fatores podem ter sido intensificados pelo aumento da temperatura média global da superfície (GMST). Por exemplo, espera-se que as mudanças climáticas intensifiquem esse padrão de teleconexão[14]. Consequentemente, o centro de alta pressão sobre o centro do Brasil está se tornando maior e mais persistente, empurrando o ar mais quente que retém mais umidade para o sul. Das cinco maiores enchentes já registradas em Porto Alegre (capital do Rio Grande do Sul), três ocorreram nos nove meses até maio de 2024, sendo que a maior ocorreu em maio de 2024, e a quarta e a quinta em novembro e setembro de 2023, respectivamente. A segunda maior ocorreu em 1941 e a terceira maior em 1873.

A literatura existente que analisa tendências de precipitação extrema e a atribuição inadequada de alguns dos eventos mais significativos de precipitação extrema e de enchentes no sul e sudeste do Brasil sugerem uma tendência crescente na intensidade e a frequência da precipitação extrema em várias regiões. Ávila et al.[13] analisaram as tendências de precipitação e sua ligação com as enchentes repentinas e deslizamentos de terra no sudeste do Brasil, revelando um aumento significativo na precipitação extrema de 1978 a 2014, especialmente em áreas montanhosas. Essas mudanças nos padrões de precipitação já impactaram o fluxo dos rios na região, com uma tendência crescente nas áreas de enchentes entre 1980 e 2015 na maioria das bacias hidrográficas do sul do Brasil [15]. Além disso, existem mudanças temporais e espaciais na ocorrência de eventos extremos de precipitação em Santa Catarina[16], o estado ao norte do Rio Grande do Sul. Além disso, para esse evento específico , uma análise analógica pelo ClimaMeter constatou que eventos de precipitação extrema são até 15% mais intensos no período de 2001–2023 em comparação com 1979–2000, estudando uma área sobre a costa leste do Rio Grande do Sul (uma caixa limitada por 48-53°W, 28-32°S), com uma contribuição menor adicional dos modos de variabilidade, incluindo o ENSO[17].

Estudos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) corroboram com esses resultados, destacando que o clima já mudou no Brasil nas últimas décadas, impactando a ocorrência de extremos climáticos, como a precipitação máxima em 5 dias (RX5day). Observações das últimas seis décadas, coletadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), mostram uma mudança notável nos padrões climáticos. Os resultados indicam um aumento entre 10 e 30% na região sul do Brasil[18]. Isso é consistente com os resultados do IPCCAR6[19], que mostram que aumentos na frequência e intensidade de eventos de precipitação intensa nesta região já foram observados no passado. Com aumentos adicionais nos níveis de aquecimento (projeções de modelo para um determinado nível de aquecimento em relação ao clima pré-industrial), espera-se que esses eventos se tornem mais frequentes e intensos. Essas condições mais úmidas provavelmente levarão a períodos mais longos de enchentes e vazões fluviais intensificadas. [20].

Com base nos modelos climáticos CMIP6, Medeiros et al.[21] constataram que o Brasil está projetado para experimentar uma tendência crescente para precipitação extrema severa e prolongada, especialmente no centro norte e nas partes sul (Almazroui et al.[22;] IPCC[19]). Outros estudos baseados em modelos climáticos CMIP5 chegaram a conclusões semelhantes: espera-se que o sul do Brasil tenha um clima médio mais úmido, juntamente com aumentos generalizados na intensidade dos dias chuvosos para o período de 2050–2100 em comparação com o sul do Brasil atual, além de maior
variabilidade da precipitação (ver Fig. 3 em Alves et al.[23]; Cai et al.[14]).

Dadas as evidências de tendências crescentes nos extremos de precipitação no sul do Brasil, aprimorar ainda mais a compreensão desses riscos é de clara significância social. Além de considerar tendências, desastres individuais proporcionam oportunidades de aprendizado para gerenciar riscos, especialmente em um clima em constante mudança. O evento de 2024 foi sem precedentes em escala, tanto em termos de meteorologia quanto de impactos, para a região. Ainda mais do que outros eventos, desastres recordes como esse mostram o que é plausível e, portanto, fornecem estudos de caso críticos. Para entender o risco em constante mudança desses eventos, este estudo busca elucidar os respectivos papéis das mudanças climáticas antropogênicas e das condições anteriores do ENSO na probabilidade e intensidade de tal risco, bem como situá-lo no contexto dos fatores de vulnerabilidade e exposição que impulsionam tais desastres.

Após o evento de 2024, a World Weather Attribution realizou um estudo rápido sobre a precipitação extrema e os fatores de vulnerabilidade e exposição que contribuíram para o desastre [24]. Para capturar a natureza da precipitação que resultou no excesso extremo de enchentes no Rio Grande do Sul, este estudo analisou dois definições de eventos: o máximo março-maio 4- e 10-dias de acumulação, em média sobre o estado do Rio Grande do Sul (Fig. 1 e S3). A precipitação extrema ocorrendo durante a estação de março a maio foi selecionada porque, apesar da relativa precipitação no ciclo sazonal médio da precipitação na região, diferentes mecanismos que levam a extremos de precipitação são prevalentes em diferentes épocas do ano, incluindo afluência do ENSO. Há também maior variabilidade observada nos extremos durante o período austral da primavera e início do verão, de setembro a dezembro (Fig. 1, S3). Duas definições temporais surgiram porque a janela de 4 dias capturou o evento individual mais severo, no qual a precipitação recorde caiu em vários dias consecutivos, enquanto a janela de 10 dias (abrangendo 26 de abril a 5 de maio, inclusive) capturou a sucessão de eventos intensos de precipitação, incluindo os dias individuais muito chuvosos em ambos os lados do pico principal de 4 dias (Fig. 1, S2). No entanto, apesar de caracterizar diferentes extremos, os resultados não foram significativamente diferentes para as duas edições de evento, em grande parte devido à magnitude extrema do maior período de 4 dias dominando ambas as edições de evento.

O estudo rápido analisou a influência tanto do aumento observado do GMST de 1,2 °C desde os tempos pré-industriais quanto do El Niño anterior (usando o índice relativo Niño3,4 de dezembro–fevereiro (DJF); veja Métodos) no evento de precipitação extrema, bem como a relativa influência em um outro aumento de 0,8 °C de aquecimento desde 2024. Este trabalho tem como principal objetivo introduzir essa análise do ENSO junto com o GMST, utilizando um modelo comum de atribuição probabilística de eventos, na literatura científica. Também se baseia no estudo original de várias maneiras, focando no evento de fim de 4 dias (doravante rx4day). Primeiro, um conjunto de dados observacional adicional em um conjunto de dados é analisado, e o evento em si é incluído em todos os conjuntos de dados do estudo original. Segundo a sensibilidade dos resultados a diferentes modelos estatísticos é testada, incluindo a escolha das covariáveis, e a distribuição estatística e suas parametrizações. Terceiro, a análise baseada em modelos é estendida para um nível de aquecimento global de 2,6 °C acima dos níveis pré-industriais (1,4 °C acima de 2024). Esse nível está alinhado com o mais recente Relatório 25 sobre a Desigualdade de Emissões do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, que reflete o provável aumento de temperatura devido às políticas atualmente implementadas.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO10, Página 5

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

Resultados

Análise observacional

Cinco conjuntos de dados observacionais interpolados (CPC, GPCC, CHIRPS e BR-DWGD) e baseados em reanálise (MSWEP) (veja 'Métodos' para mais detalhes de todos os conjuntos de dados) são usados para determinar o período de retorno do evento observado no clima atual e a variação da probabilidade de tal evento devido ao aquecimento observado do GMST de 1,2 °C e ao evento El Niño anterior. Séries temporais dos máximos de precipitação de 4 dias de março a maio em cada um desses conjuntos de dados são mostradas na Fig. 4. No momento do estudo rápido inicial, o evento foi observado apenas em CPC e MSWEP. O estudo atual inclui dados atualizados tanto para CHIRPS quanto para GPCC, incluindo o evento, e adiciona o conjunto de dados BR-DWGD até março de 2024. No entanto, isso não alterou significativamente os períodos estimados de retorno do(s) evento(s) ou as conclusões gerais do estudo.

O estudo rápido utilizou uma distribuição não-estacionária de valores extremos (GEV) generalizados que escalona com covariáveis de GMST e ENSO para modelar mudanças no índice extremo rx4day. Neste estudo, a escolha do modelo foi testada usando análises de qualidade e sensibilidade, para diferentes formulações da relação entre índice extremo e covariáveis (Tabela 4), bem como diferentes combinações de covariáveis e uso das distribuições de Gumbel e Gaussiana em vez do GEV (Tabelas 4, 5 e 6). No geral, a escala GEV com GMST e ENSO forneceu o melhor compromisso entre a boa adequação e a complexidade do modelo entre observações e modelos, e ao capturar a extremidade da distribuição em que o evento está (Figs. 5, 9 e 10). Embora outras parametrizações tenham sido rejeitadas e possam fornecer resultados quantitativos diferentes, a qualidade geral das mensagens da análise provavelmente não será afetada. Para uma compreensão mais detalhada da sensibilidade da análise, os resultados da análise baseada em observação usando um modelo sem ENSO (apenas GMST), e máximos anuais em vez de março-maio, são apresentados no material suplementar (Tabelas S1 e S2). Os resultados de toda a análise usando a distribuição Gaussiana também são mostrados no material suplementar (Tabelas S3 e S4). Nenhum desses resultados altera as mensagens gerais do estudo.

Em todos os conjuntos de dados, o evento de 2024 foi sem precedentes (Fig. 4) e, portanto, bastante raro no clima atual, com períodos de retorno de~100–250 anos e a incerteza varia de ~20 anos até o fim (Tabela 1). Para garantir a estabilidade estatística da análise diante dos registros de dados relativamente curtos (principalmente ~1979–presente), analisamos o evento de 1 em 100 anos neste estudo. Essa escolha não afeta as mudanças atribuíveis na magnitude e resultará em uma razão de probabilidade ligeiramente menor e melhor restrita, comparada a um evento de período de retorno mais alto. Esse período de retorno também é tipicamente considerado um parâmetro para análise de risco.

Todos os conjuntos de dados mostram tendências crescentes na probabilidade e intensidade de 1 em 100 anos de precipitação na região devido ao aquecimento GMST e El Niño (Fig. 5, Tabela 1). Embora as melhores estimativas mostrem tendências positivas, as tendências estimadas em similitude com GMST para todos os conjuntos de dados apresentam faixas de incerteza muito amplas, com todos os limites superiores tendendo a infinito, e limites inferiores significativamente abaixo de 1. No caso de CPC e CHIRPS, a faixa de incerteza é entre 0 e infinito, não fornecendo informações úteis no nível de certeza de 95%. O conjunto de dados BR-DWGD também possui tanto as melhores estimativas quanto os limites superiores no infinito, o que sugere uma tendência muito forte, mas que não pode ser quantificada. Como resultado, esses três conjuntos de dados são excluídos da síntese final.

A razão para essa ampla faixa de incerteza pode ser investigada mais a fundo investigando o modelo estatístico. As Figuras 4 e 5 mostram o modelo estatístico de cada conjunto de dados, com GMST e ENSO como covariáveis. Na Figura. 4, a linha verde tracejada indica uma tendência de loesse não paramétrica adaptada a cada conjunto de dados. Isso destaca que em todos os conjuntos de dados há uma oscilação decenal fraca, que atinge o pico em meados da década de 1990, diminui até cerca de 2010 e depois aumenta novamente. Um candidato para explicar isso é a Oscilação Decenal do Pacífico (PDO), um padrão de variabilidade em grande escala (representando um grupo de processos interagindo) nas temperaturas superficiais do Norte do Pacífico [c 26]. No entanto, em dados de observação e reanálise, incorporar a PDO junto com o GMST (ver Métodos) resultou em um resultado geral pior quando comparado ao GMST e ENSO, ou apenas ao GMST (Tabela 7).

Consequentemente, não conseguimos identificar uma covariável que capturasse adequadamente esse comportamento no modelo estatístico, mas observe que, devido a essa variabilidade inexplicável, há uma incerteza muito alta sobre a relação entre GMST e precipitação extrema histórica nessa região. Isso é ainda mais reforçado pela estimativa das tendências na série temporal BR-DWGD em diferentes horizontes temporais — enquanto a tendência de 1960 em diante é estritamente significativa, a tendência de 1979 em diante no mesmo conjunto de dados (correspondendo à maioria dos outros conjuntos de dados) apresenta limites de incerteza de 95% de 0 a infinito. Portanto, embora o conjunto de dados completo de longo prazo (1960–2024) não possa ser integrado quantitativamente à síntese, ele adiciona uma linha adicional de evidência a favor do aumento dos extremos em nível qualitativo. Por fim, Fig. 5 mostra as curvas de retorno para cada modelo estatístico e o conjunto de dados associado. Enquanto os dados BR-DWGD, MSWEP e GPCC são bem representados pelas respectivas curvas, CPC e CHIRPS apresentam variações significativas, com amplas e sobrepostas faixas de incerteza entre os climas pré-enviados e pré-industriais.

Apesar da oscilação inexplicada e das amplas faixas de incerteza, a consistência do aumento entre os conjuntos de dados, combinada com o impacto físico, sugere um provável aumento desses extremos com o aquecimento. Análises semelhantes usando modelos climáticos, como realizadas na seção seguinte, são, portanto, necessárias para explorar mais a fundo a quantificação desse efeito. Por fim, os resultados na intenção do ENSO são muito mais relevantes do que para GMST na análise observacional. Comparado a uma fase neutra do ENSO, o valor atual (DJF) do índice El Niño de 1,107 resultou em um aumento claro e consistente em todos os conjuntos de dados e para ambos os eventos: por um fator de 3–6 em PR e 6–11% em intensidade, com quatro dos cinco conjuntos de dados fornecendo resultados estatisticamente significativos (Tabela 1).

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

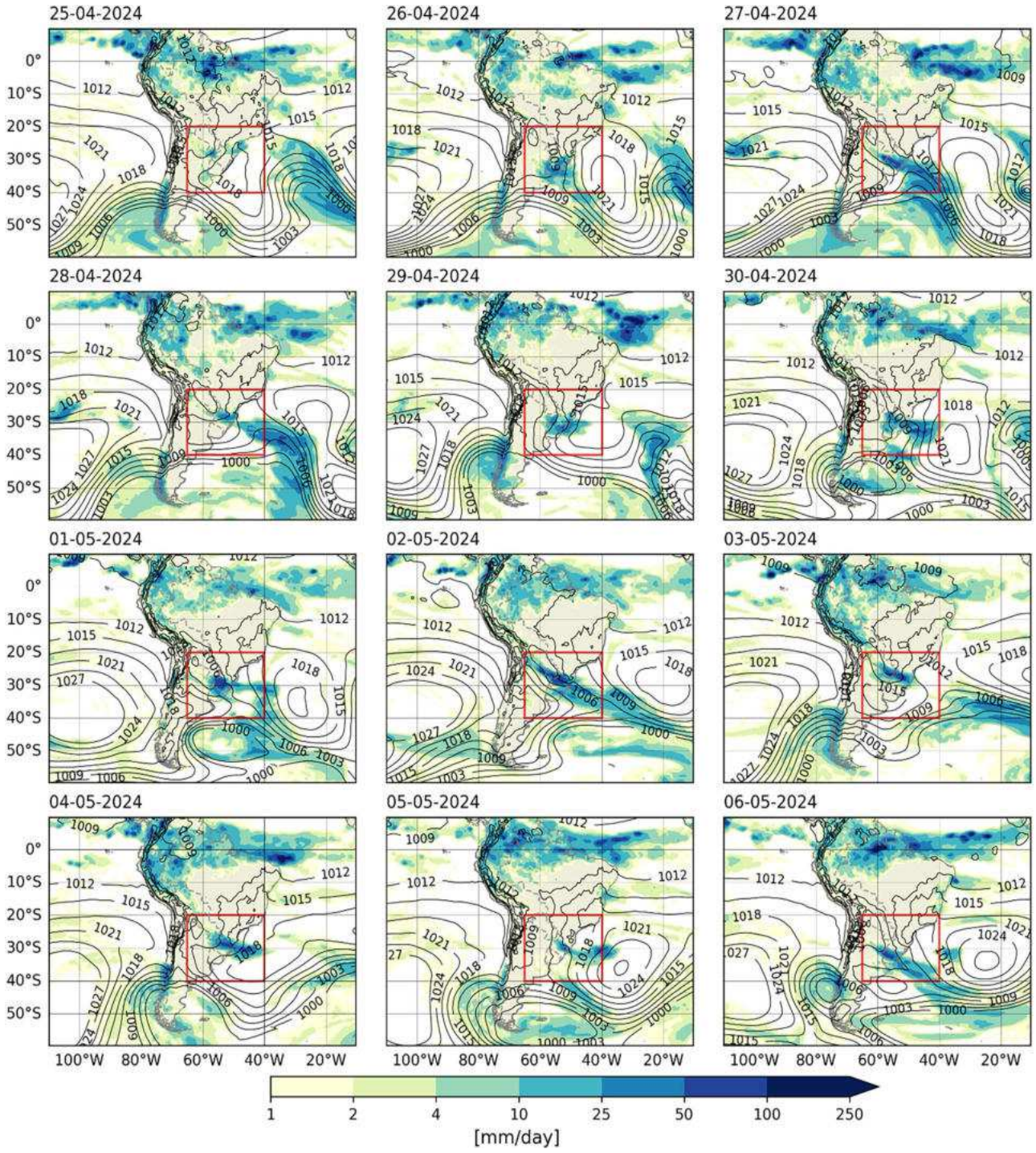


Fig. 2 | Precipitação diária e pressão média do nível do mar de 25 de abril a 6 de maio de 2024. A caixa vermelha mostra a região mostrada na Fig. 1, quadro 1. Alta pressão no Atlântico Sul facilita o transporte de umidade para o centro do Brasil, então sudeste via jato de baixa altitude sul-americano até Rio Grande do Sul. Dados do ERA5: embora esses dados de precipitação não sejam usados no estudo, o conjunto de dados é usado aqui para entender a dinâmica de eventos em grande escala.

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

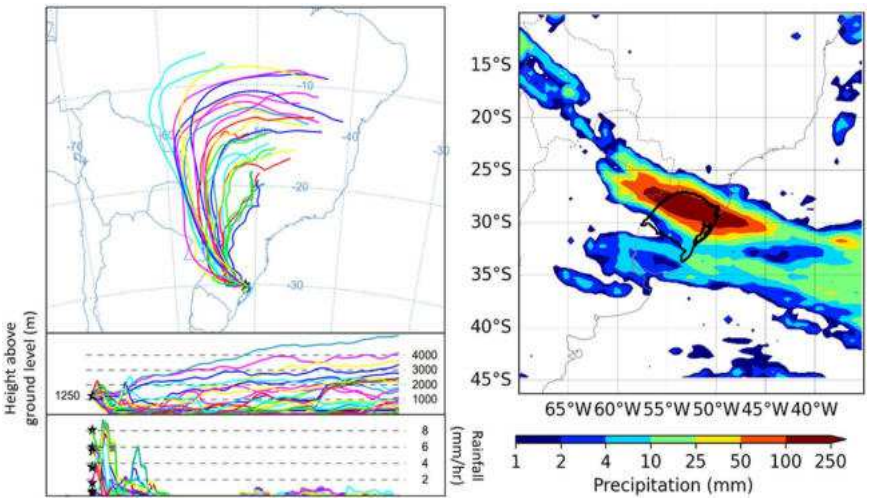


Fig. 3 | Trajetórias retroativas das massas de ar e totais resultantes de precipitação sobre o Rio Grande do Sul durante o final de abril - início de maio de 2024. um conjunto (à esquerda) de trajetórias retrocessas de 5 dias terminando em Porto Alegre, Rio Grande do Sul (30,04°S, 51,21°W) e a aproximadamente 850 hPa (1250 m acima do nível do solo) em 2 de maio. O mapa mostra os caminhos horizontais de transporte dos lotes de ar, o painel central mostra a elevação correspondente do lote de ar (em metros) e o painel inferior mostra a precipitação (em mm por hora). Fonte: NOAA Hysplit[83]. b (direita) Estimativas de precipitação baseadas em satélite em 02/05/2024 sobre a América do Sul Central e Rio Grande do Sul (preto). Dados: IMERG (veja 'Métodos' para detalhes).

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

Precipitação(mm)

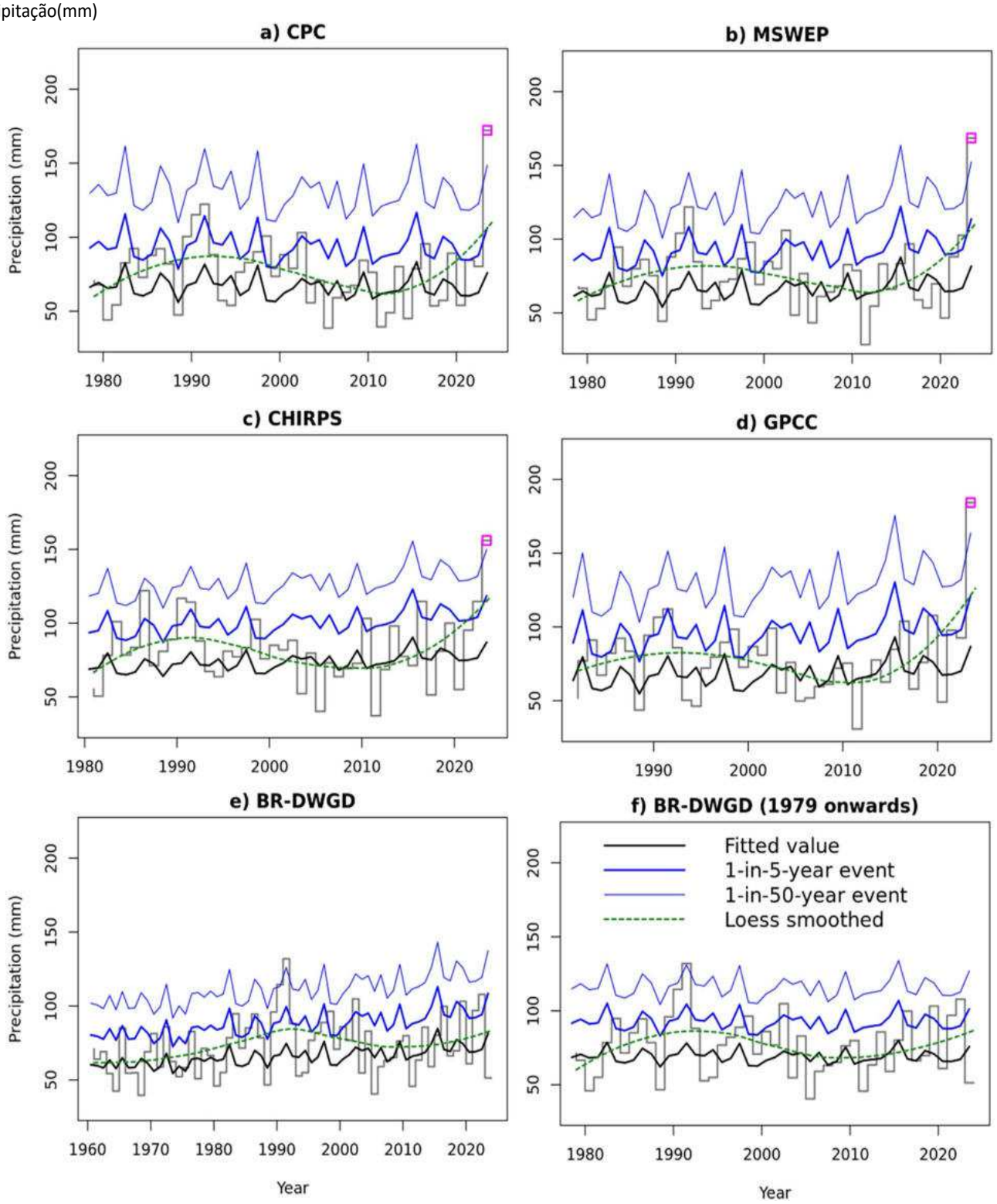
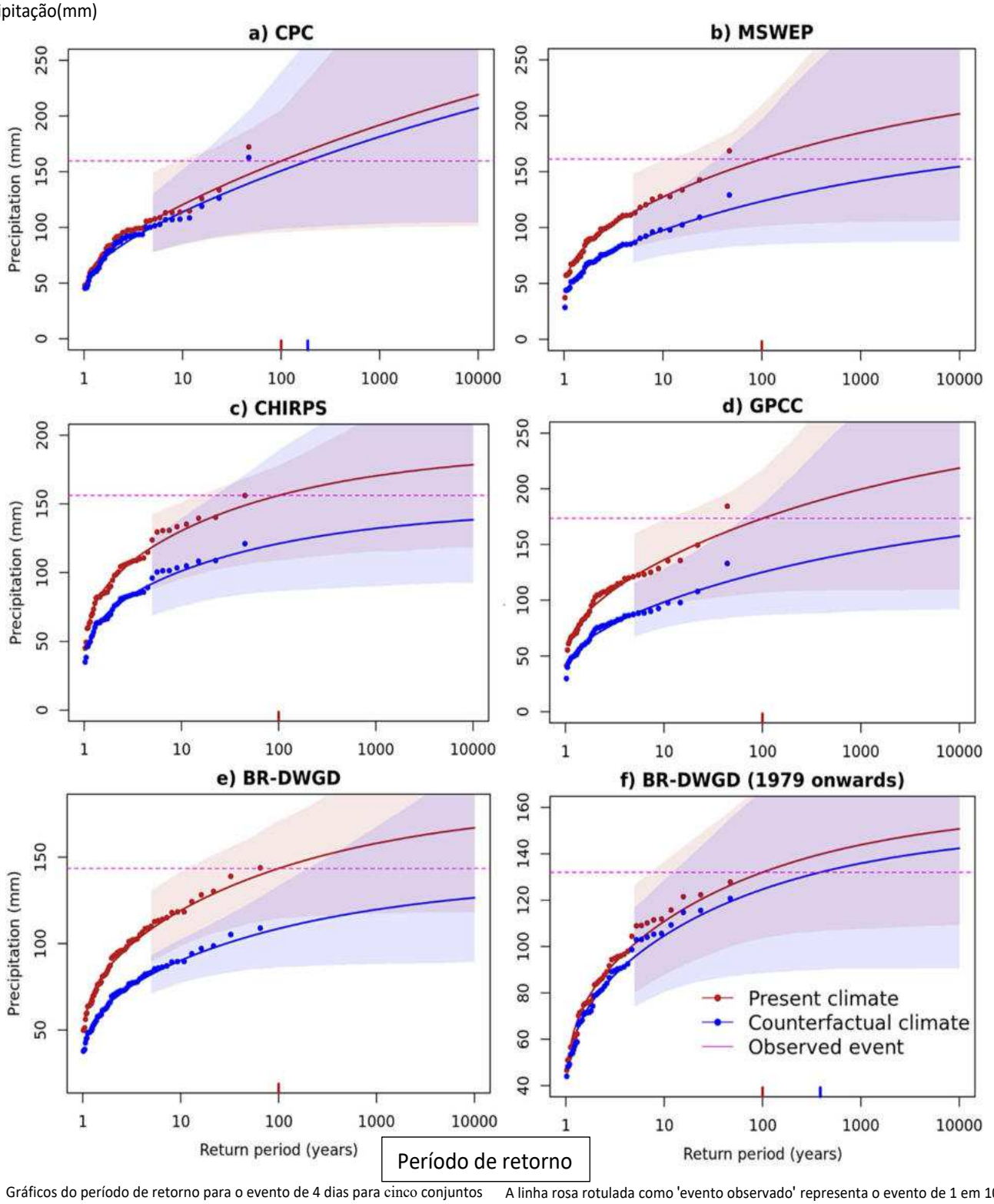


Fig. 4 | Máximos de março–maio de precipitação acumulada em 4 dias sobre o Rio Grande do Sul nos cinco conjuntos de dados observacionais e de reanálise, incluindo BR-DWGD em linhas de base mais longas e curtas (linhas cinzas). a CPC, b MSWEP, c CHIRPS, d GPCC, e BR-DWGD, f BR-DWGD (de 1979 em diante). A linha preta sólida mostra o tendência associada ao aumento do GMST e da variabilidade devido ao Niño 3,4; as linhas azuis mostram a magnitude esperada de eventos de 1 em 5 anos e 1 em 50 anos sob o mesmo modelo estatístico. A linha verde pontilhada mostra um loesse não paramétrico suavizado às observações. O evento de 2024 é mostrado como uma caixa rosa.

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

Precipitação(mm)



Período de retorno

Fig. 5 | Gráficos do período de retorno para o evento de 4 dias para cinco conjuntos de dados observacionais e de reanálise usados neste estudo. a CPC, b MSWEP, c CHIRPS, d GPCC, e BR-DWGD, f BR-DWGD (de 1979 em diante). Os pontos de dados representam a série temporal completa de Rx4day para cada conjunto de dados, escalados para o clima atual e um clima sem aquecimento antropogênico. O evento observado é mostrado pelo ponto vermelho mais alto e pelo A linha rosa rotulada como 'evento observado' representa o evento de 1 em 100 anos usado nesta análise. As áreas sombreadas representam os intervalos de confiança de 95% nas curvas, e o grau de sobreposição entre os limites de incerteza de cada curva indica a incerteza dentro da incerteza geral sob influência geral do GMST, conforme quantificado na Tabela 1.

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

Tabela 1 | Magnitude observada e período de retorno das acumulações de 4 dias no final de abril e início de maio de 2024 e variação na razão e magnitude de probabilidade para 1 em acumulações de 4 dias em 100 anos no Rio Grande do Sul, devido tanto ao GMST quanto ao ENSO

Conjunto de dados	Evento observado		Magnitude de 1 evento em 100 anos em 2024 clima (mm)	Influência do GMST (intervalos de confiança de 95%)		Influência do ENSO (95% de confiança intervalos)	
	Magnitude (mm)	Período de retorno		Probabilidade Razão	Mudança em Magnitude (%)	Probabilidade Razão	Mudança em Magnitude (%)
CPC	172.2	234.0 (22.46–inf)	159.6	1.86 (0–inf)	5.84 (−33.1–85.8)	3.24 (1.29–inf)	10.8 (3.14–23.22)
MSWEP	168.6	188,88 (20,58 – inf)	161.2	498,03 (0,0001– inf)	30.57 (−18.2–108)	4,90 (1,36–inf)	10.66 (3.06–22.17)
PIADOS	156.1	99.13 (14.76– inf)	156.1	Inf(0– inf)	28.97 (−23.2–94.8)	4,56 (0,81–inf)	6.60 (−0.81–16.07)
GPCC	184.3	237,78 (23,81 – inf)	173.3	6376.1 (0.17–inf)	38.67 (−12.3–117.6)	5.13 (1.20–inf)	11.27 (2.71–25.33)
BR-DWGD	N/A	N/A	147.8	Inf (5,29– inf)	38.82 (10.45–73.5)	6.17 (1.21–inf)	8.12 (1.18–15.66)
BR-DWGD (1979 em diante)	N/A	N/A	136.5	248.77 (0–inf)	13.89 (−15.22– 62.01)	8,60 (1,12–inf)	7.79 (0.74–16.92)

Os intervalos de confiança de 95% estão mostrados entre parênteses. O texto em negrito mostra onde o resultado é estatisticamente significativo no nível de 95%.

Síntese de atribuição

Para avaliar a influência atribuída a mudanças climáticas antropogênicas e a fase ENSO no valor 1 em 100 anos do índice rx4day, sintetizamos evidências tanto de produtos baseados em observação quanto de modelos climáticos, utilizando um procedimento probabilístico de síntese de atribuição revisado por pares [27]. Antes dessa síntese, modelos climáticos eram avaliados quanto à sua capacidade de reproduzir padrões e extremos de precipitação na região (ver 'Métodos' e Material Suplementar; Figos. S4–9, Tabela S5). Isso depende em parte da capacidade dos modelos de representar a dinâmica subjacente, como o SALLJ e as tendências associadas nas taxas de transporte de umidade [28]. Trabalhos recentes mostram que GCMs e RCMs de última geração estão cada vez mais capazes de capturar esse fenômeno, seja diretamente[29] ou indiretamente, por meio da representação precisa dos extremos de precipitação [30,31]. Além disso, durante a etapa de avaliação do modelo, a capacidade dos modelos de capturar os fenômenos relevantes é implicitamente avaliada comparando os parâmetros estatísticos do modelo com os dos produtos baseados em observação (ver 'Métodos' e Material Suplementar; Tabela S5). No entanto, mudanças nessas dinâmicas ao longo do tempo continuam sendo fonte de profunda incerteza nos resultados apresentados aqui. Isso poderia ser minimizado isolando a influência termodinâmica usando a abordagem de storyline, ou investigado mais a fundo por meio de mudanças nos ventos atmosféricos e no transporte de umidade[29], embora tais análises estejam fora do escopo deste estudo.

Na etapa de avaliação do modelo, nenhum modelo ou membro do conjunto foi classificado como 'bom' em todos os critérios (Tabela S5). Por isso, usamos modelos que foram classificados como 'razoáveis' no geral e rejeitamos aqueles com quaisquer aspectos 'ruins'. No total, ficamos com 9 dos 13 modelos CORDEX, todos os 11 modelos CMIP6, 2 dos 3 membros do conjunto AM2 e 7 dos 10 membros do conjunto FLOR. Após a etapa de avaliação, usamos o mesmo modelo estatístico que considera GMST e ENSO para os modelos e produtos baseados em observação para avaliar suas respectivas oscilações, estimando os parâmetros separadamente para cada conjunto de dados individuais duplos na Tabela 2. Combinando os resultados de conjuntos de dados observacionais/de reanálise e conjuntos de modelos usando o procedimento de síntese (ver Métodos) produz um statement de atribuição abrangente. As figuras 6–8 mostram as mudanças de probabilidade e intensidade para as observações (azul), modelos (vermelho) e síntese (magenta), para o aumento de 1,2 °C do GMST (Fig. 6), o DJFEl Niño anterior (Fig. 7), e o futuro aumento GMST para 2,6 °C no pré-industrial (Fig. 8).

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

Tabela 2 | Resultados observacionais e de atribuição de modelos para eventos de precipitação máxima de MAM de 4 dias no Rio Grande do Sul

Modelo/observações	Limiar para Evento do período de retorno de 100 anos (mm)	GMST		ENSO	
		Razão de probabilidade PR	Mudança na intensidade ΔI [%]	Razão de probabilidade PR	Mudança na intensidade ΔI [%]
BR-DWGD	147.8	2.7e + 20 (5.3 ... 3.6e + 79)	39 (10 … 74)	6.2 (1.2 ... 8.2e + 2)	8.1 (1.2 … 16)
CPC	159.58	1,9 (0,0 ... ∞)	5,8 (−33 ... 86)	3.2 (1.3 … 51)	11 (3.1 … 23)
MSWEP	161.22	5.0e + 2 (0.00061 ... 2.7e + 20)	31 (−18 ... 1.1e + 2)	4.9 (1.4 ... 2.3e + 2)	11 (3.1 … 22)
GPCC	173.39	6.4e + 3 (0.17 ... 3.4e + 17)	39 (−12 ... 1.2e + 2)	5.1 (1.2 ... 4.0e + 2)	11 (2.7 … 25)
PIADOS	156.13	∞ (0,0 ... ∞)	29 (−23 ... 95)	4.6 (0.81 ... 8.1e + 2)	6.6 (-0.81 … 16)
CORDEX					
CanESM2_rcp85_RCA4 (1)	123.20	5.0e + 2 (0.87 ... ∞)	20 (−1,6 ... 36)	19 (2,0 ... ∞)	12 (6.2 … 19)
GFDL-ESM2M_rcp85_RCA4 (1)	94.88	52 (1,8 ... ∞)	32 (5.1 … 68)	4.6 (1.9 ... ∞)	13 (6.6 … 22)
HadGEM2-ES_rcp85_RCA4 (1)	80.76	2.1 (0.18 ... ∞)	4.1 (−15 ... 21)	1,9 (0,74 ... ∞)	3.8 (−1.8 ... 10)
HadGEM2-ES_rcp85_RegCM4-7 (1)	116.89	65 (0,15 ... ∞)	8.4 (−6.5 ... 24)	1.4 (0.33 ... ∞)	1.1 (−5.4 ... 6.8)
MPI-ESM-LR_rcp85_RCA4 (1)	93.82	1.2 (0.25 … 39)	4.4 (−19 ... 37)	1.5 (0.70 … 4.3)	7.9 (−5.1 ... 22)
MPI-ESM-LR_rcp85_REMO2009 (1)	209.33	2.6 (1.1 … 9.2)	22 (2.7 … 46)	1.1 (0.76 … 1.8)	1.9 (−5.6 ... 11)
MPI-ESM-MR_rcp85_RegCM4-7 (1)	154.47	47 (0,90 ... ∞)	39 (−1,6 ... 93)	2,5 (0,68 ... ∞)	9,9 (−3,5 ... 30)
NorESM1-M_rcp85_RCA4 (1)	99.44	1.2e + 2 (2.3 ... ∞)	32 (8.1 … 59)	2.3 (1.2 ... ∞)	6.7 (2.1 … 12)
NorESM1-M_rcp85_RegCM4-7 (1)	130.24	2.1e + 2 (0.16 ... ∞)	20 (−11 ... 58)	21 (1.8 ... ∞)	14 (4.0 … 25)
CMIP					
EC-Earth3_ssp585_r1i1p1f1 (1)	124.37	(0.35 … 15)	2,5 (−12 ... 20)	2.1 (1.0 … 5.4)	7.5 (0.42 … 15)
EC-Terra3-CC_ssp585_r1i1p1f1 (1)	139.36	2.1 (0.66 … 22)	7.2 (−4.7 ... 19)	4.0 (1.9 … 20)	13 (5.9 … 20)
EC-Terra3-Veg-LR_ssp585_r1i1p1f1 (1)	113.64	8,0 (0,79 ... ∞)	13 (−1,5 ... 31)	5.1 (1.6 … 82)	11 (3.3 … 18)
INM-CM4-8_ssp585_r1i1p1f1 (1)	91.03	11 (0,77 ... ∞)	21 (−2.4 ... 51)	0.62 (0.28 … 1.4)	−4,8 (-11 ... 2.7)
INM-CM5-0_ssp585_r1i1p1f1 (1)	113.86	0.76 (0.092 … 30)	−3,6 (−32 ... 33)	1.2 (0.60 … 2.8)	2.7 (−5.1 ... 11)
KACE-1-0-G_ssp585_r1i1p1f1 (1)	179.00	0.74 (0.25 … 2.5)	−3,8 (−18 ... 12)	1.2 (0.71 … 2.0)	2,0 (−3,8 ... 8.4)
MIROC6_ssp585_r1i1p1f1 (1)	162.77	1.1e + 2 (0.63 ... ∞)	28 (−4,5 ... 63)	9.6 (2.2 ... ∞)	16 (6.5 … 26)
MPI-ESM1-2-HR_ssp585_r1i1p1f1 (1)	148.67	0.50 (0.10 … 7.5)	−7,6 (−27 ... 16)	2.4 (1.3 … 6.9)	9.5 (2.6 … 17)
MPI-ESM1-2-LR_ssp585_r1i1p1f1 (1)	126.27	0.67 (0.13 … 4.1)	−5.1 (-24 ... 16)	2.1 (1.2 … 4.4)	9.5 (2.3 … 17)
NESM3_ssp585_r1i1p1f1 (1)	111.33	0.87 (0.23 … 4.8)	−1.1 (−10 ... 10)	2.5 (0.99 … 21)	6.8 (−0.043 ... 13)
NorESM2-LM_ssp585_r1i1p1f1 (1)	108.34	1.4 (0.073 ... 1.6e + 2)	3.0 (−23 ... 34)	1.8 (0.73 … 6.4)	4.8 (−2.2 ... 14)
AM2.5C360 (2)		5,5 (0,68 ... 5.3e + 2)	11 (-2.4 … 26)	2.4 (1.1 … 9.4)	6.1 (1.1 … 12)
Membro do grupo 6	86.47	9.6 (1.6 ... 5.3e + 2)	16 (3.5 … 30)	1.4 (0.56 … 5.1)	2.1 (−3.2 ... 8.1)
Membro do conjunto 7	77.49	3.2 (0.30 ... 5.0e + 2)	6.8 (−7.8 ... 22)	4.2 (2.0 … 17)	10 (5.7 … 15)
FLOR (7)		6,0 (0,27 ... 6.8e + 3)	9.1 (0.87 … 18)	4.3 (0.86 … 48)	6.9 (4.5 … 9.5)
Membro do grupo 1	82.62	1.2e + 2 (4.9 ... ∞)	16 (6.7 … 26)	3.8 (1.8 … 13)	5.9 (3.2 … 8.7)
Membro do elenco 2	77.95	1.6e + 4 (2.0 ... ∞)	11 (2.5 … 21)	34 (5.2 ... ∞)	7.8 (5.3 … 10)
Membro do conjunto 3	78.18	16 (0,93 ... ∞)	7.8 (-0.25 … 17)	11 (3.6 ... ∞)	7.1 (4.7 … 9.8)
Membro do conjunto 5	79.13	2.4 (0.79 … 11)	5.8 (-1.5 … 13)	2.5 (1.7 … 6.1)	6.2 (3.9 … 8.6)
Membro do conjunto 8	78.88	12 (1.2 ... ∞)	11 (1.0 … 21)	3.6 (2.1 … 9.1)	5.9 (3.3 … 8.5)
Membro do grupo 9	77.34	10 (1.2 ... 1.1e + 8)	11 (1.4 … 21)	3.6 (2.2 … 11)	6.6 (4.3 … 9.0)
Membro do grupo 10	74.58	4.7 (0.71 ... ∞)	5.4 (−1.4 ... 13)	14 (3.9 ... ∞)	8.3 (6.2 … 11)

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

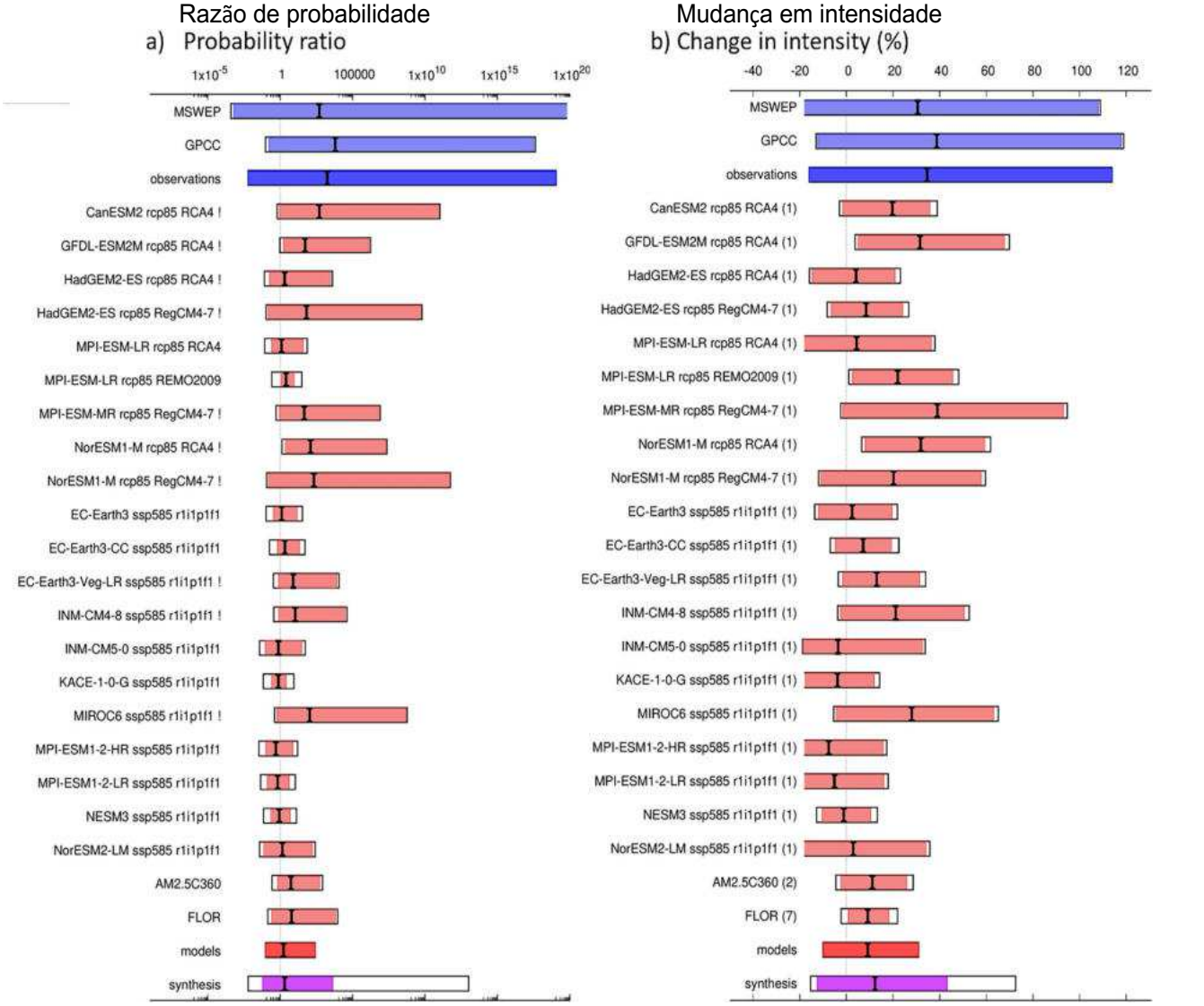


Fig. 6 | Síntese das razões de probabilidade (à esquerda) e das mudanças de intensidade (%: direita) ao comparar o período de retorno e as magnitudes da precipitação máxima de 4 dias de 1 em 100 ano de MAM sobre o Rio Grande do Sul no clima de 2024 e um clima mais frio de 1,2 °C . A melhor estimativa para cada conjunto de dados é mostrada pela linha preta central, com a faixa de incerteza dada pela largura da barra (veja Métodos e referências nela para todos os detalhes). Em um, o '!'ao lado de alguns nomes de modelos, mostra onde o limite superior estava era infinito, e o eixo x para a razão de probabilidade é limitado a $10^{2}0$. Em b, o número entre parênteses de cada modelo mostra o número de membros do conjunto incluídos nas estimativas da razão de probabilidade e da mudança de intensidade.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO10, Página 13

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

Embora as incertezas em torno das observações e de alguns modelos sejam muito grandes, o quadro geral é consistente: todos os conjuntos de dados observacionais e 17 de 22 (77%) modelos mostram aumentos em rx4day devido a um aumento de 1,2 °C no GMST (Fig. 6). Esse nível de concordância com o modelo excede o limiar 'provável' de Mastrandrea et al. (2011)[33], comumente usado pelo IPCC. O aumento com o GMST é ainda mais reforçado pelo maior conjunto de dados observacionais, BR-DWGD, que indicou uma forte tendência estatisticamente significativa ao usar dados a partir de 1960, reduzindo a influência da variabilidade Inter decenal (Tabela 1). De forma semelhante, para o ENSO, todos os conjuntos de dados observacionais e todos, exceto um modelo (95%), mostram aumento no rx4day devido ao El Niño de 2023/24 (Fig. 7). Ao quantificar esses efeitos, os resultados da síntese mostram que o aquecimento GMST de 1,2 °C resultou em um aumento da probabilidade por cerca de 2,0 (~0,06 a 4200) e um aumento de intensidade de 12% (~−12% a
+43%), e o El Niño resultou em um aumento da semelhança por cerca de 2,4 vezes (~0,7 a 37) e um aumento de intensidade de 9% (0,3% a 20%) em relação a uma fase neutra (Tabela 3). Usar uma distribuição Gaussiana em vez de um GEV fornece uma mensagem semelhante, com mudanças muito semelhantes nas razões de intensidade e probabilidade aproximadamente 1,5–2,5 maiores do que para o GEV (Tabela S4).

A influência antropogênica atribuída é ainda corroborada pela avaliação da mudança de probabilidade e intensidade em um clima mais quente de 1,4 °C comparado ao momento do evento observado (2,6 °C acima do pré-industrial). Novamente, há incertezas relativamente grandes para modelos individuais, mas uma semelhança geral crescente, com razão de probabilidade de cerca de 1,7 (~0,5–30) e uma variação de intensidade de cerca de 7% (~−6 a +19%) (Tabela 3; Fig. 8). Embora as estimativas baseadas em modelos sejam consistentemente muito menores do que as observadas até o momento, e ligeiramente abaixo das expectativas físicas da relação Clausius-Clapeyron, não temos como afirmar se essas estimativas são provavelmente conservadoras, dadas as amplas faixas de incerteza observacional.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO10, Página 14

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

Discussão

As inéditas enchentes no Rio Grande do Sul em abril–maio de 2024 afetaram mais de 90% dos municípios do estado, ou uma área equivalente ao Reino Unido, deslocando cerca de 600.000 pessoas e causando mais de 180 mortes. O risco geral de tal catástrofe depende de três fatores-chave: risco, exposição e vulnerabilidade. Este estudo explora os principais fatores que impulsionam o risco. No entanto, é crucial colocar esses resultados no contexto dos fatores de vulnerabilidade e exposição, para avaliar a probabilidade mutável desses impactos tanto agora quanto no futuro, sendo estes últimos dependentes de escolhas políticas em diferentes escalas.

Primeiro, embora o estado seja frequentemente visto como abastado, ele ainda possui bolsões significativos de pobreza e marginalização. A baixa renda está fortemente correlacionada com uma maior vulnerabilidade aos impactos das enchentes [34]. Assentamentos informais, vilarejos indígenas e comunidades predominantemente quilombolas (descendentes de africanos escravizados) foram severamente impactados [35] e [37] anos. A ausência de um evento significante extremo de enchente até recentemente em Porto Alegre contribuiu para a redução do investimento e manutenção de seu sistema de proteção de enchentes [38–40], com o sistema supostamente começando a falhar a 4,5 m de transbordamento apesar de sua capacidade declarada de suportar água até 6m [41]. Isso, além da natureza extrema desse evento, contribuiu para os impactos significativos da enchente e aponta para a necessidade de avaliar objetivamente o risco e fortalecer a infraestrutura da enchente para ser resiliente a essa e a futuras, ainda mais extremas, enchentes.

Além disso, embora leis de proteção ambiental existam no Brasil para proteger vias navegáveis da construção e limitar mudanças no uso do solo, elas não são aplicadas, ou aplicadas de forma consistente, levando à invasão de terras propensas a enchentes e, portanto, aumentando a exposição de pessoas e infraestrutura aos riscos de enchentes[42–44]. Por fim, previsões e alertas estavam disponíveis quase uma semana antes [45, 46], mas o alerta pode não ter alcançado todos os em risco, e pode não ter comunicado adequadamente a gravidade potencial dos impactos ou informado as pessoas sobre quais ações tomar em resposta às previsões. É fundamental continuar aprimorando a comunicação sobre riscos que levam a ações adequadas e que salvam vidas.

O risco do desastre em si foi sem precedentes. O total de precipitação em 4 dias sobre o Rio Grande do Sul foi considerado extremamente raro em um clima atual, com um período de retorno de 100 a 250 anos. Este estudo focou em um evento de período de retorno de 1 em 100 anos, que também é tipicamente considerado um parâmetro para análise de risco. Primeiro, o ENSO foi considerado importante para explicar a variabilidade na precipitação observada, consistente com pesquisas anteriores. A maioria dos eventos anteriores de precipitação intensa na região ocorreu durante os anos do El Niño e, de forma semelhante, o papel do El Niño nesse evento foi significativo. Em observações, comparado a uma fase neutra do ENSO, o atual El Niño (dezembro-fevereiro) resultou em um aumento consistente em todos os conjuntos de dados, indicando sua importância na análise. Segundo, para avaliar o papel das mudanças climáticas induzidas pelo homem e do ENSO, combinamos produtos baseados em observação e modelos climáticos que incluem a relação observada com o ENSO e avaliamos mudanças na probabilidade e intensidade da precipitação intensa de 4 dias sobre o Rio Grande do Sul. Os resultados sugerem que as condições de El Niño no momento da ocorrência provocaram um aumento da probabilidade em cerca de 2,4 (0,7–37) e um aumento de intensidade de 9% (0,3–20%) em relação a uma fase neutra.

Terceiro, o GMST impulsionou um aumento na probabilidade de um fator de 2 (0,06–4200) e um aumento da intensidade de ~12% (−13% a +43%). Esses resultados são corroborados ao observar um clima de aquecimento global de 2,6 °C desde tempos pré-industriais, onde encontramos um aumento adicional na probabilidade de um fator de ~1,7 (0,5–30) e um aumento na intensidade de cerca de 7% (−6% a +19%) em comparação com o mundo de 1,2 °C em 2024. Quase nenhum desses resultados de síntese são significativos no nível de 95% de confiabilidade, e as razões de probabilidade apresentam amplas faixas de incerteza. Essas variações de incerteza resultam em parte de uma aparente variabilidade decenal recente em muitas séries temporais observacionais desde ~1980. Essa variabilidade não aparece no período de 1960–1980 no único conjunto de dados diário em grade confiável disponível para esse período, mas investigações posteriores disso são dificultadas pela escassez de outros conjuntos de dados semelhantes. Como resultado, a quantificação do papel do GMST continua desafiadora.

No entanto, há várias linhas de evidência que sugerem que o GMST ampliou esse evento de precipitação (assim como as condições de El Niño, em proporção semelhante), sugerindo que mensagens qualitativas fortes podem ser tiradas. São as seguintes. Primeiro, a consistência das tendências crescentes (embora com altas incertezas) entre conjuntos de dados e modelos observacionais em grade, e entre modelos estatísticos. Segundo a relação Clausius-Clapeyron dá uma base física subjacente robusta para esperar tais resultados. Terceiro, o forte aumento desses extremos desde a década de 1960 em um único conjunto de dados sugere que uma variabilidade decenal mais recente, provavelmente não relacionada à atualidade do GMST, aumentou as incertezas em conjuntos de dados mais curtos. Quarto, outros cientistas que estudam extremos semelhantes usando outros métodos chegam a uma conclusão semelhante.

Em conjunto, a análise de riscos no contexto de vulnerabilidade e exposição indica que o Rio Grande do Sul provavelmente enfrentará impactos mais frequentes e severos relacionados à fortes e severas enchentes no futuro, especialmente sem investimentos sérios em mitigação e respostas de adaptação. As enchentes revelaram a distribuição desigual da infraestrutura de proteção de enchentes, que perpetua desigualdades em ambientes urbanos. Regiões não protegidas, tipicamente habitadas por populações de baixa renda, enfrentam riscos maiores de enchentes e de impactos associados. Essa disparidade cria uma armadilha da pobreza, onde aqueles em áreas não protegidas são mais suscetíveis a desastres relacionados a enchentes, levando a perdas repetidas e dificultando o progresso econômico. Enfrentar essas questões exige uma abordagem abrangente de planejamento urbano e gestão de projetos de enchentes que priorizem proteção e desenvolvimento equitativos. Investimentos futuros na proteção de enchentes devem integrar considerações sociais, econômicas e ambientais no planejamento urbano para ajudar a criar cidades mais inclusivas e resilientes.

Por fim, dada a natureza sem precedentes do evento, trabalhos adicionais sobre a confluência de agentes podem ser informativos. Por exemplo, explorar se esse evento pertence à mesma distribuição dos eventos extremos passados e se foi simplesmente amplificado por uma combinação de ENSO e GMST, ou se outros fenômenos físicos conspiraram para criar um evento único que poderia ser representado por uma distribuição extrema de cauda mais pesada ou até separada[, 47].

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

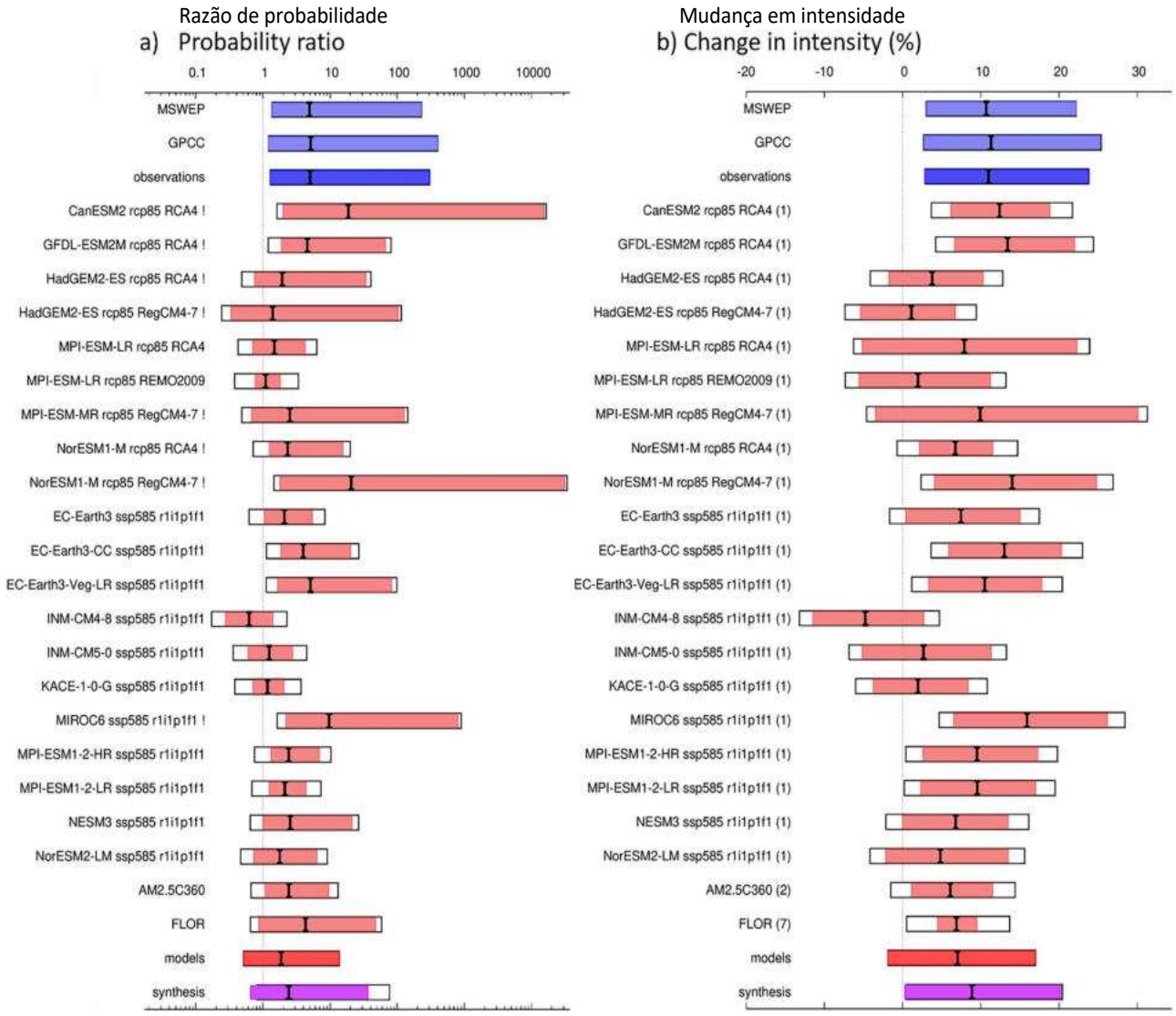


Fig. 7 | Síntese das razões de probabilidade (à esquerda) e das mudanças de intensidade (%: direita) ao comparar o período de retorno e as magnitudes da precipitação máxima de 4 dias de 1 em 100 anos de MAM sobre o Rio Grande do Sul no atual evento El Niño e uma fase ENSO neutra. A melhor estimativa para cada conjunto de dados é mostrada pela linha preta central, com a faixa de incerteza dada pela largura da barra (veja Métodos e referências para detalhes completos). Em um, o '! ' ao lado de alguns nomes de modelos, mostra onde o limite superior era infinito. Em b, o número entre parênteses de cada modelo mostra o número de membros do conjunto incluídos nas estimativas da razão de probabilidade e da mudança de intensidade.

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

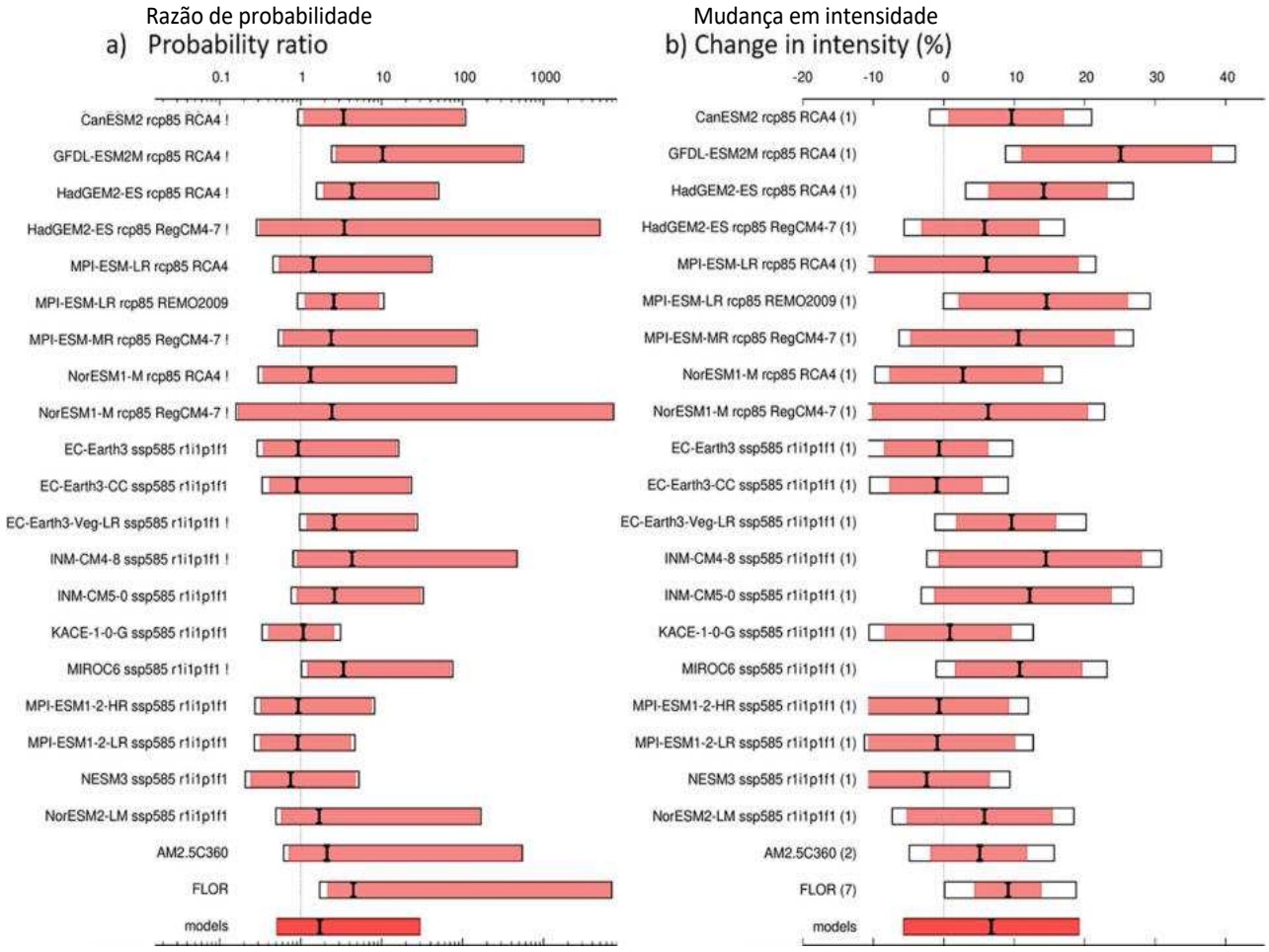


Fig. 8 | Síntese das razões de probabilidade (à esquerda) e das mudanças de intensidade (%: direita) ao comparar o período de retorno e as magnitudes da precipitação máxima de 4 dias de 1 em 100 anos de MAM sobre o Rio Grande do Sul no clima de 2024 e um clima mais quente de 1,4 °C. A melhor estimativa para cada conjunto de dados é mostrada pela linha preta central, com a faixa de incerteza dada pela largura da barra (veja Métodos e referências Aqui para todos os detalhes). Em um, o '! ' ao lado de alguns nomes de modelos, mostra onde o limite superior estava emfimde noite. Em b, o número entre parênteses de cada modelo mostra o número de membros do conjunto incluídos nas estimativas da razão de probabilidade e da mudança de intensidade.

Tabela 3 | Resumo dos resultados para 1 em 100 ano de precipitação máxima de 4 dias de março a maio, apresentado em Figs. 6–8: mudanças devido ao GMST incluem mudanças passado-presente e mudanças presente-futuro para o estado El Niño de 2023/24, mudanças devido ao ENSO incluem El Niño versus fases neutras no clima atual

Dados	GMST			ENSO (El Niño vs. Neutro)	
	Período de tempo	Razão de probabilidade (IC 95%)	Mudança de intensidade (%) (IC 95%)	Razão de probabilidade (IC 95%)	Mudança de intensidade (%) (IC 95%)
Observações	Passado - Presente	1780 (0.0061– 1020)	34,6 (−16,0–114)	4.39 (1.08 – 254)	9.82 (1.02–22.5)
Modelos		1.71 (0.096–260)	9.13 (−9.94–31.0)	1.86 (0.51–13.7)	7,03 (−1,90–17,0)
Síntese		2.04 (0.063–4210)	12,3 (−12,5–43,2)	2.42 (0.65–36.6)	8.87 (0.30–20.2)
Apenas modelos	Presente - Futuro	1.73 (0.51–29.8)	6.77 (−5.68–19.2)	N/A	N/A

Os intervalos de confiança de 95% estão mostrados entre parênteses. O texto em negrito mostra onde o resultado é estatisticamente significativo no nível de 95%.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO10, Página 17

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

Métodos

Detalhes do evento

Porto Alegre está situada às margens do rio Guaíba, onde cinco rios se encontram. Em maio de 2024, os níveis da água subiram mais de 5 m — superando o limite de 3 m do nível da enchente [48,49]. Embora o sistema de proteção de enchente seja projetado para suportar enchentes de até 6 m, relatos sugerem que o mau funcionamento dos motores e as frestas entre as portas e a parede levara-os a começar a entrar na cidade 1,5 m abaixo de sua capacidade declarada[de 41]. Além disso, um colapso parcial da represa da usina hidrelétrica "14 de Julho" no rio Das Antas, há cerca de 180 km a noroeste de Porto Alegre, teria causado uma elevação de água de aproximadamente 2 m, aumentando o transbordamento nas comunidades inundadas próximas [a 50–52].

Devido à extensa inundação, cinco barragens hidrelétricas foram fechadas e o fornecimento de energia teve que ser cortado, deixando meio milhão de pessoas sem eletricidade em Porto Alegre e arredores. Apenas uma das seis estações de tratamento de água da cidade permaneceu em operação, deixando cerca de 650.000 pessoas — aproximadamente um terço da população do estado — sem água [53,54]. Cerca de 3.000 unidades de saúde foram afetadas, incluindo 110 hospitais, 17 dos quais encerraram suas operações completamente e 75 prestaram apenas serviços parciais [35]. Os esforços de socorro foram severamente prejudicados por danos extensos à infraestrutura devido tanto à enchentes extinção de floos quanto aos deslizamentos de terra, com mais de 15.000 deslizamentos desencadeados pelo evento. 95 bloqueios foram relatados em rodovias por todo o estado e Porto Alegre ficou quase completamente isolada. O aeroporto internacional só reabriu totalmente no final de 2024[1956].

As repercussões econômicas das enchentes são extensas; a economia do Estado representa cerca de 6,6% do PIB do Brasil e estimativas preliminares sugerem uma queda de 0,3% no PIB nacional como resultado do evento [57]. A produção alimentar, que representa quase 17% do PIB do estado, foi particularmente impactada, com o banco brasileiro Bradesco prevendo uma recessão de 3,5% no setor agrícola brasileiro em 2024 e possíveis picos de preços, especialmente no arroz e laticínios, são uma preocupação particular[58]. Os danos totais do evento ultrapassaram US$15 bilhões [59].

O Rio Grande do Sul é altamente suscetível à enchentes devido à sua baixa altitude (10 m acima do nível do mar) e vastos sistemas fluviais. Mudanças extensas no uso e na cobertura do solo agravaram esse risco. Uma pesquisa da MapBiomas mostra que, de 1985 a 2022, o estado perdeu 22% de sua vegetação nativa (3,6 milhões de hectares), principalmente para a produção de soja [42,60]. Na Bacia do Guaíba, onde os riscos de enchentes são maiores, esse nível sobe para 26% (1,3 milhão de hectares). A destruição de florestas, campos e várzeas diminuíram a capacidade da terra de absorver precipitação, intensificando o risco de enchente. A expansão urbana e a agricultura em larga escala na bacia agravam ainda mais esses riscos. A capital do estado, Porto Alegre, teve enchentes significativas em 1873, 1928, 1936, 1941, 1967 e 2023[40,43]. Para proteger Porto Alegre de recorrentes enchentes, a cidade construiu um sistema de proteção contra enchentes em 1974, cuja característica mais proeminente é o Muro Mauá; um dique de concreto com 2,6 m de comprimento e 3 m de altura. Esse sistema extenso, que abrange 68 km no total, compreende muros, diques, 23 estações de bombeamento e 14 comportas [39, 41 e 61]

Em algumas regiões, especialmente na ampla faixa central dos vales, planalto, encosta e áreas metropolitanas, as acumulações de precipitação ultrapassaram 300 mm em menos de uma semana. Por exemplo, no município de Bento Gonçalves, os volumes chegaram a 543,4 mm.

De 29 de abril a 2 de maio, quando fortes chuvas se instalaram sobre o Rio Grande do Sul, os acúmulos variaram entre 200 mm e 300 mm. Na capital, Porto Alegre, o volume atingiu 258,6 mm em apenas três dias. Essa quantidade corresponde a mais de 2 meses de chuva, comparada aos valores climatológicos de abril (114,4 mm) e maio (112,8 mm) de 1990 a 2020.

As estações do INMET que registraram mais chuva entre 26 de abril e 9hs da manhã de 2 de maio foram Soledade (488,6 mm), Santa Maria (484,8 mm) e Canela (460 mm). A estação meteorológica convencional em Santa Maria estabeleceu um recorde de precipitação em 24 horas com 213,6 mm em 1º de maio. Essa foi a maior precipitação registrada no município em 112 anos de observação, superando o recorde anterior de 182,3 mm estabelecido em 23 de junho de 1944. Em apenas 3 dias, o total de precipitação na cidade atingiu 470,7 mm, o que corresponde a 3 meses de chuva segundo a média climatológica de 1990–2020.

Uma comparação entre grandes precipitações e eventos de enchentes em 1941 e 2024 mostra que, enquanto em 1941 levou 22 dias para o nível da água no Lago Guaíba atingir 4,76 m acima do normal, em 2024 levou apenas 5 dias para que Guaíba ultrapassasse 5 m 49 (Fig. S1), bem acima do nível de transbordamento de 3 m necessário para atingir a cidade[48]. Além disso, o evento de 2024 não envolveu apenas Porto Alegre, mas partes de 90% dos municípios do estado, com todo o excesso de água desembocando, eventualmente, no Guaíba. Em 1941, caiu menos chuva, mas combinada com ventos fortes vindos do sul, foi suficiente para causar um desastroso transbordamento. . Consequentemente, as enchentes de 2024 também são mais impactantes. O evento de 1941 inundou 15.000 casas e deixou 70.000 pessoas sem teto. Um terço do comércio e da indústria da região ficou fechado por cerca de 40 dias. O evento de 2024 afetou todo o estado e muitas outras cidades, mais de 2,1 milhões de pessoas, com 600.000 pessoas deslocadas e 76.000 cidadãos vivendo em abrigos apenas na área metropolitana de Porto Alegre. A área também ainda estava se recuperando das enchentes em setembro e novembro de 2023, quando o rio Guaíba atingiu 3,18 m e 3,46 m[49].

Dados observacionais

Neste estudo, utilizamos seis conjuntos de dados observacionais e de reanálise para visualizar e analisar os extremos de precipitação em constante mudança:

1. IMERG—Este produto utiliza o algoritmo Integrado Multi-satellitE de Recuperação para GPM (IMERG) da NASA para combinar informações da constelação de satélites GPM para estimar a precipitação na maior parte da superfície da Terra. O IMERG funde estimativas de precipitação coletadas durante a operação do satélite TRMM (1998–2015) com estimativas recentes de precipitação coletadas pela missão GPM (2014–presente). O IMERG está disponível de 1998 até o presente em tempo quase real, com estimativas de precipitação terrestre atualizadas a cada meia hora. Aqui, os dados diários são usados com resolução espacial de 0,5° × 0,5°.
2. Precipitação diária do CPC. Este é o produto interpolado da NOAA PSL, Boulder, Colorado, EUA, conhecido como Dados Diários Interpolados Globais da CPC, e está disponível em resolução de 0,5° × 0,5°, para o período de 1979 ao presente. Os dados estão disponíveis na NOAA (https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html).
3. O conjunto de dados Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) v2.8 (atualizado da referência 62 é totalmente global, disponível em intervalos de 3 horas e com resolução espacial de 0,1°, disponível de 1979 a ~3 horas em tempo real. Este produto combina dados baseados em medidor, satélite e reanálise.
4. O produto de precipitação desenvolvido pelo Grupo de Riscos Climáticos da UC Santa Barbara chamado "Grupo de Riscos Climáticos Infravermelho de Precipitação com Dados da Estação (CHIRPS)[63]. Dados diários estão disponíveis em resolução de 0,05°. O

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO10, Página 18

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

produto incorpora imagens de satélite com dados in situ da estação.

5. Dados Completos do GPCC Produto Diário Versão 2022 dos totais diários globais de precipitação na superfície terrestre baseados em dados de precipitação fornecidos pelos serviços meteorológicos e hidrológicos nacionais, regionais e globais, bem como dados WMO GTS.
6. Os Dados Diários Meteorológicos Brasileiros Interpolados (BR-DWGD) estão disponíveis para toda a superfície terrestre do Brasil com resolução espacial de 0,1° × 0,1°, de 01/01/1961 a 20/03/2024[2065].

Como medida das mudanças climáticas antropogênicas, usamos a temperatura média global da superfície (GMST), onde o GMST é obtido da análise da temperatura de superfície do Instituto Goddard de Ciências Espaciais (GISS) da NASA(National Aeronautics Space Administratioin).

Como medida do ciclo El Niño—Oscilação do Sul (ENSO), usamos o índice relativo Niño3.4. Este é o índice Niño3.4 (média SST acima de 5°S–5°N, 120°–170°W) menos a SST entre 20°S e 20°N para ajustar o índice para mudanças climáticas, conforme proposto na referência. 68, mas sem reescalar a cada mês civil.

Por fim, como medida da Oscilação Decadal Pacífica (PDO) , usamos o índice definido por Mantua et al.[84]. Este é o principal componente das anomalias mensais de temperatura da superfície do mar, no Oceano Pacífico Norte, em direção ao polo, a 20°N. As anomalias médias mensais da média global de SST são removidas para separar esse padrão de variabilidade do aquecimento global.

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

Descrições de modelos e experimentos

Usamos uma coleção de conjuntos de modelos com enquadramentos muito diferentes [69]: dois conjuntos multimodelo de experimentos de modelagem climática — um conjunto regional de modelos climáticos e outro um conjunto acoplado de modelos de circulação global — e três conjuntos de modelos únicos relacionados ao modelo FLOR, um dos quais é um modelo acoplado atmosfera-oceano, com os outros sendo a temperatura da superfície do mar (SST) modelos globais de circulação impulsionados.

- Experimento Regional Coordenado de Redução de Escala Climática CORDEX-
  CORE South America (11 modelos com resolução de 0,44° (SAM-44) e 3 modelos com resolução de 0,22° (SAM-22)) conjunto multimodelo [70,71], compreendendo 14 simulações resultantes de emparelhamento de Modelos Climáticos Globais (GCMs) e Modelos Climáticos Regionais (RCMs)). Essas simulações são compostas por simulações históricas até 2005 e estendidas até o ano 2100 usando o cenário RCP8.5.
- CMIP6. Consiste em simulações de 13 modelos participantes com Resoluções variadas. Para mais detalhes sobre o CMIP6, por favor, veja a referência. 72. Para todas as simulações, o período de 1850 a 2015 é baseado em simulações históricas, enquanto o cenário SSP5-8.5 é usado pelo restante do século XXI.
- Os modelos climáticos FLOR [73]e AM2.5C360 [74,75] são desenvolvidos em
  Laboratório de Dinâmica dos Fluidos Geofísica (GFDL). O modelo FLOR é um GCM acoplado atmosfera-oceano com resolução de 50 km para terra e atmosfera e 1° para oceano e gelo. Dez simulações de conjunto do FLOR são analisadas, que cobrem o período de 1860 a 2100 e incluem tanto os experimentos históricos quanto os do RCP4.5 conduzidos por forçamentos radiativos transitórios do CMIP5[76]. AM2.5C360 é um
  GCM atmosférico baseado no modelo FLOR[75,77] com uma

  resolução horizontal de 25 km. Três simulações de conjunto da Atmospheric
  O experimento do Projeto de Inter comparação de Modelos (AMIP) (1871–2100) foi analisado. Forçamentos radiativos utilizam valores históricos entre 1871–2014 e valores RCP4.5 depois disso. As simulações são iniciadas a partir de três condições pré-industriais diferentes, mas forçadas pelos mesmos SSTs do HadISST1[78] após ajustes por grupo[74] entre 1871 e 2020. Os SSTs entre 2021 e 2100 são do experimento FLOR RCP4.5 10 - valores médios de conjunto após correção de viés.

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

Métodos estatísticos Neste estudo, analisamos séries temporais do Rio Grande do Sul das máximos de precipitação acumulada de março a maio em 4 dias, onde há inúmeros registros de dados observados. Métodos para análise observacional e de modelos, bem como para avaliação e síntese de modelos, são utilizados de acordo com o Protocolo de Atribuição Climática Mundial (WWA), descrito na referência. 69, com detalhes de apoio encontrados nas referências. 79,80.

As etapas da análise incluem: (i) cálculo de tendência a partir de observações; (ii) validação de modelos; (iii) atribuição multi-método multimodelo e (iv) síntese do statement de atribuição. Calculamos os períodos de retorno, Razão de Probabilidade (PR; a o fator de mudança na probabilidade do evento) e variação da intensidade (ΔI, a variação na magnitude da métrica entre os dois estados de referência) do evento em estudo para comparar o clima do presente e o clima do passado, definidos respectivamente pelos valores GMST de 2024 e do passado pré-industrial (1850–1900, baseado no Índice de Aquecimento Global – https://www.globalwarmingindex.org/).

Para modelar estatisticamente as mudanças por semelhança e intensidade do evento em estudo, adaptamos uma distribuição não estacionária com uma ou mais covariáveis, incluindo o GMST. No estudo rápido, foi utilizada uma distribuição generalizada de valores extremos (GEV) que escala com o GMST e a Oscilação do Sul El-Niño (ENSO). Este último é representado pelo índice relativo Niño3,4, feito em média durante o período dezembro-fevereiro (DJF) para capturar o pico típico da oscilação.

Aqui, as distribuições GEV, Gumbel e Gaussiana estão ajustadas a cada série temporal observacional, juntamente com covariáveis apenas do GMST, e tanto o GMST quanto o índice DJF Niño. Os modelos estatísticos são os seguintes:

A variável de interesse, X, pode ser suposta como seguindo uma distribuição GEV na qual os parâmetros de localização e escala variam tanto com GMST quanto com ENSO:

$$X \sim GEV(\mu; \sigma; \xi|\mu_0; \sigma_0; \alpha; \beta; T; I) \quad (1)$$

onde X denota a variável de interesse, precipitação máxima de 4 dias da estação chuvosa; T é o GMST suavizado; I é o índice Niño3.4 de tendenciado; μ_0, σ_0 e ξ são os parâmetros de localização, escala e forma da distribuição não estacionária; e α, β são as tendências devido ao GMST e ENSO, respectivamente. Como resultado, a localização e a escala da distribuição têm valores diferentes a cada ano, determinados tanto pelo GMST quanto pelo Niño3.4 estados. A estimativa de máxima semelhança é usada para estimar os parâmetros do modelo, com

$$\mu = \mu\, Exp^{\alpha T + \beta I/\mu_o} \text{ e } \sigma = \sigma\, Exp^{\alpha T + \beta I/\mu_o} \quad (2)$$

Então, a distribuição de Gumbel é apenas essa formulação com o parâmetro de forma igual a zero, tal que

$$X \sim GB(\mu; \sigma; \xi = 0|\mu_0; \sigma_0; \alpha; \beta; T; I) \quad (3)$$

Essa suposição simplifica o modelo ao reduzir o número de parâmetros ajustados, mas requer testes.

De forma semelhante, a variável de interesse, X, pode ser assumida como seguindo uma distribuição normal na qual os parâmetros de localização e escala variam tanto com GMST quanto com ENSO:

$$X \sim N(\mu; \sigma|\mu\,; \sigma\,; \alpha; \beta; T; I) \quad (4)$$

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO10, Página 21

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

onde X denota a variável de interesse, precipitação na estação chuvosa; T é o GMST suavizado; I é o índice Niño3.4 de tendenciado; μ_0 e σ_0 são os parâmetros de média e variância da distribuição não estacionária; e α, β são as tendências devido ao GMST e ENSO, respectivamente. Os parâmetros de localização e escala seguem a Eq. (2).

Para todos os modelos estatísticos descritos acima, assume-se que a distribuição escala exponencialmente com as covariáveis, mantendo a dispersão (a razão entre o desvio padrão e a média) constante ao longo do tempo. Essa formulação para os parâmetros de escala e localização (a suposição da 'escala') reflete a relação Clausius-Clapeyron, que implica que a precipitação escala exponencialmente com a temperatura[81,82], e assim a precipitação escalará exponencialmente com a intensidade do índice Niño3,4 de tendenciado. Outras formulações são testadas na Tabela 4, incluindo a suposição de 'deslocamento', na qual o parâmetro de localização se desloca linearmente com o GMST, e a combinação de ambas as suposições, 'deslocamento & escala'. A formulação de deslocamento é a seguinte:

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

Tabela 4 | As pontuações AIC para modelos estatísticos se ajustam a cada série temporal rx4day , com o evento de 2024 incluído (exceto BR-DWGD) para diferentes formulações e combinações de covariáveis

Dataset	Scale		Shift		Shift & Scale	
	GMST	GMST + Nino	GMST	GMST + Nino	GMST	GMST + Nino
CPC	424.24	421.11	423.86	421.65	425.01	423.81
CHIRPS	406.12	405.694	406.74	406.56	405.69	407.48
GPCC	400.32	396.82	400.93	398.52	400.31	398.62
MSWEP	422.52	419.12	422.89	419.82	421.76	420.57
BR -DWGD	551.96	548.42	552.57	550.64	553.86	551.91

O texto em negrito mostra as 2 melhores pontuações para cada série temporal.

Tabela 5 | As pontuações AIC para modelos estatísticos se ajustam a cada série temporal rx4day , incluindo o evento de 2024 para diferentes distribuições e combinações de covariáveis

Conjunto de dados	GEV		Gaussiana		Gumbel	
	GMST	GMST + Nino	GMST	GMST + Nino	GMST	GMST + Nino
CPC	424.24	421.11	428.50	421.84	422.26	419.47
PIADOS	406.12	405.69	405.20	404.60	406.29	406.58
GPCC	400.32	396.82	401.60	395.99	398.82	396.27
MSWEP	422.52	419.12	423.95	418.58	421.22	418.68

O texto em negrito mostra as 2 melhores pontuações para cada série temporal.

$$\mu = \mu_0 + \alpha T + \beta I \text{ e } \sigma = \sigma_0; \quad (5)$$

E a formulação de deslocamento e escala é dada por:

$$\mu = \mu_0 + \alpha\mu T + \beta\mu I \quad \text{e } \sigma = \sigma_0 Exp(\alpha\sigma T + \beta\sigma I) \quad (6)$$

Em todos esses modelos, os efeitos do GMST e do índice Niño3.4 de tendenciado são assumidos como independentes um do outro, de modo que a mudança de intensidade devido ao GMST não seja afetada pela variação de intensidade causada pela fase ENSO. Observamos que isso pode não ser o caso no mundo real, já que a intensidade e frequência dos eventos El Niño podem ter sido influenciadas pelas mudanças climáticas[14]; no entanto, ao usar um índice ajustado Niño3.4, buscamos minimizar a correlação entre os dois fatores e, portanto, não esperamos que os resultados qualitativos deste estudo sejam afetados por essa suposição simplificadora.

O Critério de Informação de Akaike (AIC) é usado para determinar a ajustabilidade relativa para diferentes parametrizações, distribuições e combinações de covariáveis, enquanto penaliza modelos mais complexos para evitar desajuste. As tabelas 4, 5, 6 e 7 mostram as pontuações do AIC para cada série temporal com diferentes distribuições e covariáveis.

Primeiro, em quase todas as séries temporais e distribuições, encontrar um modelo estatístico usando tanto o GMST quanto esse índice ENSO como covariáveis proporciona uma posição melhorada, de acordo com o Critério de Informação de Akaike (AIC), do que o GMST sozinho, que vale independentemente do evento estar incluído ou não no ajuste(Tabelas 5 e 6). A adição do PDO também não melhora o ajuste, em comparação com o GMST isolado ou o GMST e ENSO (Tabela 7).

Tabela 6 | As pontuações do AIC para modelos estatísticos se ajustam a cada série temporal rx4day, com o evento de 2024 excluído para diferentes distribuições e combinações de covariáveis

Conjunto de dados	GEV		Gaussiana		Gumbel	
	GMST	GMST + Nino	GMST	GMST + Nino	GMST	GMST + Nino
CPC	401.53	399.81	400.35	399.16	403.80	402.79
PIADOS	388.28	389.60	386.99	388.54	391.53	392.66
GPCC	375.13	373.61	374.93	374.27	381.20	380.32
MSWEP	401.27	399.76	399.59	398.78	404.20	403.26
BR-DWGD	551.96	548.42	553.20	548.01	551.32	549.71
Conjunto de modelos						
CORDEX		376.41		380.06		
CMIP		402.76		406.57		
AM		336.65		340.55		
FLOR		335.34		335.12		

O texto em negrito mostra as 2 melhores pontuações para cada série temporal.

Tabela 7 | As pontuações do AIC para o modelo estatístico se ajustam a cada série temporal rx4day, incluindo o evento de 2024 (exceto para o BR-DWGD) para diferentes combinações de covariáveis

Conjunto de dados	Covariantes		
	GMST	GMST + Nino	GMST + PDO
CPC	424.24	421.11	426.24
PIADOS	406.12	405.69	407.93

GPCC	400.32	396.82	402.10
MSWEP	422.52	419.12	424.50
BR - DWGD	561.91	559.84	561.89

O texto em negrito mostra as 2 melhores pontuações para cada série temporal.

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

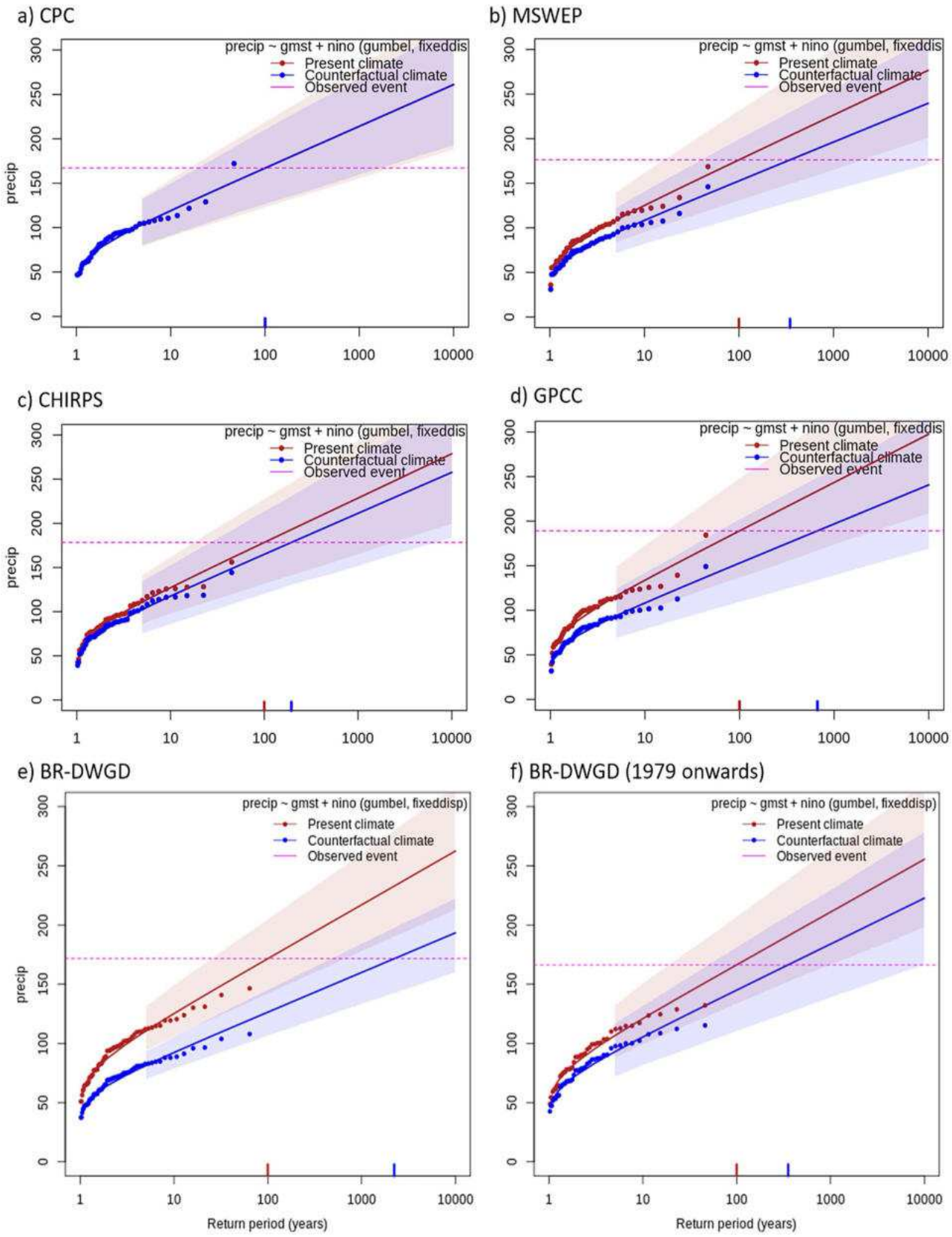


Fig. 9 | Gráficos do período de retorno para o evento de 4 dias para cinco conjuntos de dados observacionais de reanálise usados neste estudo. a CPC, b MSWEP, c CHIRPS, d GPCC, e BR-DWGD, f BR-DWGD (de 1979 em diante), no clima atual e plotados para um clima sem aquecimento antropogênico, modelado usando uma distribuição de Gumbel. O evento observado é mostrado pelo ponto vermelho mais alto e a linha roxa rotulada como 'evento observado' representa o evento de 1 em 100 anos usado nesta análise.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO10, Página 25

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

A influência da corrente(DJF) El Niño é portanto considerada ao longo deste estudo.

Segundo, as várias distribuições apresentam desempenhos diferentes dependendo ou não se o evento está incluído na análise e nos modelos e observações/reanálise. Quando o evento está incluído na série temporal (Tabela 5)

Tabela 5), a distribuição Gaussiana é a que melhor performa, com as distribuições GEV e Gumbel classificadas de forma semelhante no

geral. Inspecionar visualmente os respectivos gráficos de nível de retorno ajuda a destacar seu desempenho em diferentes regiões da distribuição, o que mostra claramente que, embora a distribuição de Gumbel se encaixe bem em mais dados, ela possui desempenho muito ruim por uma margem expressiva na cauda da distribuição onde ocorre o evento (Fig. 9), enquanto as distribuições Gaussiana e GEV capturam essa região mais de perto (Fig. 5 e 10). Isso é confirmado repetindo a mesma avaliação inicial, mas sem o evento de 2024. Quando o evento é removido, a distribuição Gumbel performa pior dentro da distribuição por uma margem expressiva (Tabela 6) e,

portanto, não é utilizada na análise. Enquanto isso, a distribuição Gaussiana tem melhor desempenho geral para conjuntos de dados observacionais e de reanálise, mas a distribuição GEV tem melhor desempenho para os dados do modelo, e ambas estão razoavelmente próximas (Tabela 6). Como resultado, a análise no corpo principal do estudo utiliza o GEV, enquanto os resultados da Gaussiana são mostrados no material suplementar (Tabelas S3 e 4). Isso ajuda a testar quão sensíveis são os resultados (tanto qualitativos quanto quantitativos) à escolha do modelo estatístico.

A etapa de atribuição multimétodo multimodelo do protocolo WWA envolve estimar, para cada modelo climático, o nível efetivo de retorno de um evento de 1 em n anos sob o estado climático atual e estimar a mudança esperada na probabilidade e intensidade de tal evento após uma mudança específica nas covariáveis. Como o GMST suavizado geralmente cresce de forma monótona, a abordagem padrão da WWA é simplesmente considerar o GMST 2024 do modelo como uma covariável e estimar a magnitude esperada de um *evento de n* anos. No entanto, o clima factual neste estudo está definido pelo GMST de 2024 e pela média do índice DJF Niño3.4 com a tendência removida. Durante a etapa de atribuição, o índice Niño3.4 com a tendência removida derivado do modelo climático é estabilizado de modo que o subconjunto de 1990–2020 tenha média 0 e variância 1; o clima 'factual' é então definido como tendo o GMST de 2024 do modelo e o valor observado de 2024 do índice Niño3.4 com a tendência removida, estabilizados da mesma forma. Isso elimina quaisquer possíveis vieses nos resultados devido às diferenças entre a amplitude do índice Niño3.4 modelado e a observada.

https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8

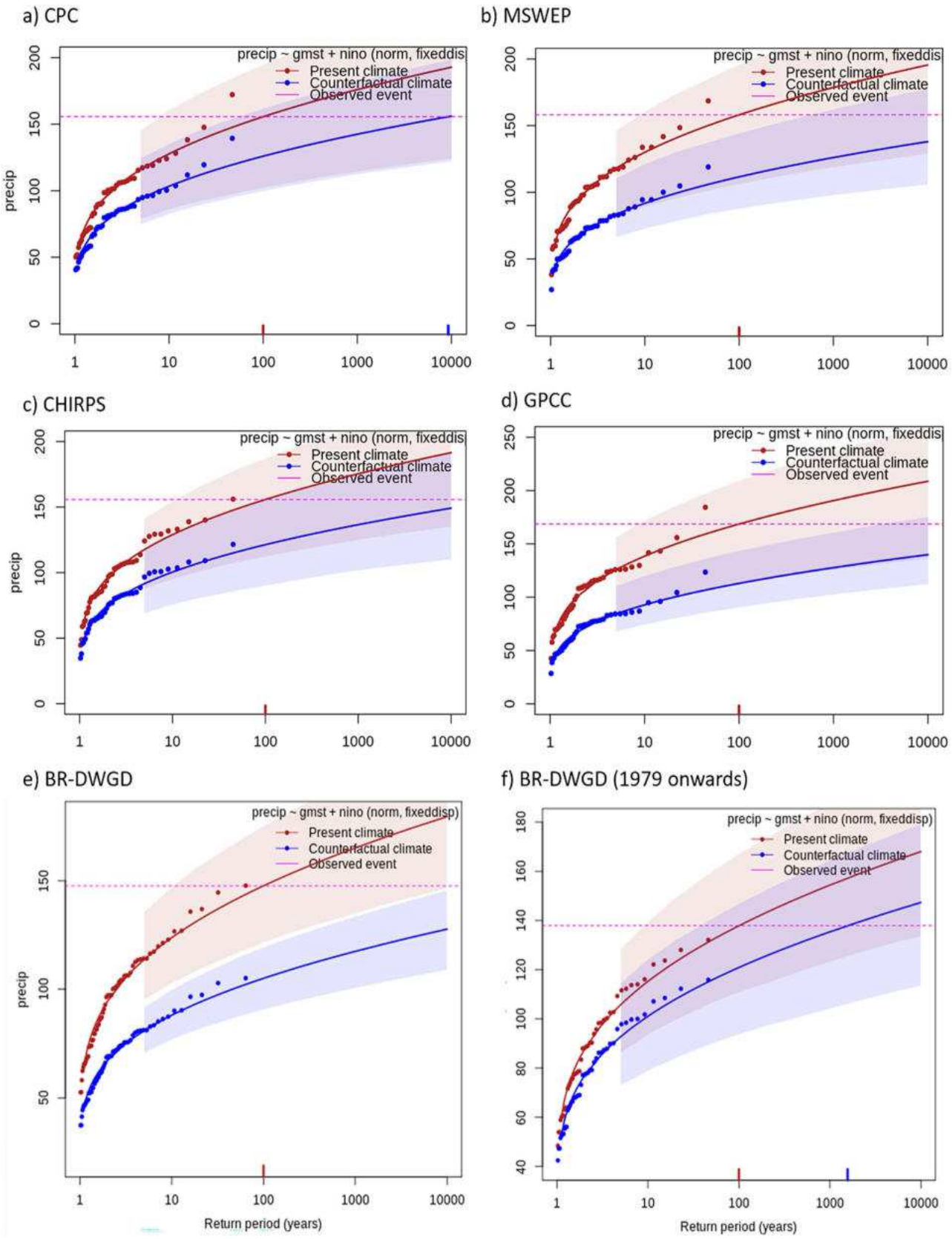


Fig. 10 | Gráficos do período de retorno para o evento de 4 dias para cinco conjuntos de dados observacionais e de reanálise usados neste estudo. a CPC, b MSWEP, c CHIRPS, d GPCC, e BR-DWGD, f BR-DWGD (de 1979 em diante), no clima atual e escalados para a clima sem aquecimento antropogênico, modelado usando uma distribuição Gaussiana. O evento observado é mostrado pelo ponto vermelho mais alto e a linha roxa rotulada como 'evento observado' representa o evento de 1 em 100 anos usado nesta análise.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO10, Página 27

Atribuição multimodelo

Nesta seção, mostramos os resultados da avaliação do modelo para a região de estudo do Rio Grande do Sul e região circundante do sudeste da América do Sul. Os modelos climáticos são avaliados em relação às observações em sua capacidade de capturar:

1. Ciclos sazonais: comparamos qualitativamente os ciclos sazonais com base nos resultados do modelo com ciclos baseados na observação. Descartamos os modelos que apresentam picos multimodais e/ou mal definidos em seus ciclos sazonais (veja o apêndice Figs. S7–S9 para ciclos sazonais).
2. Padrões espaciais: comparamos qualitativamente os padrões espaciais com base nos resultados dos modelos com padrões baseados na observação. Modelos que não correspondem às observações em termos dos padrões de precipitação em grande escala são excluídos (veja o Apêndice Figs. S4–S6 para padrões espaciais).
3. Parâmetros dos modelos FI GEV (parâmetros de dispersão e forma). Descartamos o modelo se os intervalos de parâmetros modelo e observação não se sobrepõem.
4. Correlação entre os extremos de precipitação de março a maio e o índice Niño3,4 com tendência reduzida. Descartamos o modelo se os intervalos de parâmetros modelo e observação não se sobrepõem.

Os modelos são rotulados como 'bons', 'razoáveis' ou 'ruins' com base em seus desempenhos nos quatro critérios discutidos acima. Avaliamos 13 modelos do CORDEX e 11 modelos do CMIP6, além de 3 experimentos do modelo AM2 e 10 execuções do modelo FLOR.

Todos os modelos CMIP6, dois dos três AM2 e sete dos dez modelos FLOR são membros do conjunto, e todos, exceto dois modelos CORDEX, passam pelos critérios de avaliação como 'razoáveis', sem que nenhum modelo seja classificado como 'bom' (destacado em amarelo na Tabela S2). Todos os modelos mostraram-se 'bons' ou .'razoáveis' na reprodução das correlações observadas do Niño3.4 (não mostradas na Tabela S2).

O procedimento de síntese utilizado aqui foi revisado por pares[27] e funciona da seguinte forma. Antes de combinar as diferentes linhas de evidência de conjuntos de dados observacionais e de reanálise e modelos climáticos em uma avaliação sintetizada, várias fontes de erro são consideradas. Primeiro, um erro de representação é adicionado (em quadratura) às observações, para considerar a diferença entre conjuntos de dados baseados em observações que não podem ser explicados pela variabilidade natural. Isso é mostrado nessas figuras como caixas brancas ao redor das barras azul-claros. A barra azul escura mostra a média sobre os produtos baseados em observação. Em seguida, um termo para explicar a dispersão entre modelos é adicionado (em quadratura) à variabilidade natural dos modelos. Isso é mostrado nas figuras como caixas brancas ao redor das barras vermelhas claras. A barra vermelha escura mostra a média do modelo, consistindo em uma média ponderada usando as incertezas (não correlacionadas) devido à variabilidade natural mais o termo representando a dispersão entre modelos (ou seja, o inverso do quadrado das barras brancas). Para os conjuntos AM2 e FLOR, esses membros individuais foram primeiro sintetizados (usando o mesmo método) em um único resultado antes de serem incluídos na síntese mais ampla.

Para a síntese final, resultados de produtos e modelos baseados em observação (Tabela 6) são combinados em um único resultado de duas maneiras. Primeiramente, negligenciamos as incertezas comuns dos modelos além da dispersão entre modelos representada pela média do modelo e calculamos a média ponderada dos modelos (barra vermelha escura) e das observações (barra azul escura): isso é indicado pela barra magenta. Como, devido às incertezas comuns do modelo, a incerteza do modelo pode ser maior do que a dispersão entre modelos; em segundo lugar, também mostramos a estimativa mais conservadora de uma média direta e não ponderada das observações (barra vermelha escura) e dos modelos (barra azul escura) contribuindo com 50% cada, indicada pela caixa branca ao redor da barra magenta nos argumentos de síntese.

Disponibilidade de dados Os dados usados para esta análise e para produzir todas as figueiras estão disponíveis publicamente em https://github.com/BenJClarke18/Brazil_floods_2024e https://zenodo.org/records/17855714 .

Disponibilidade de Código O código usado para esta análise e para produzir todos os figuras está disponível publicamente em https://github.com/BenJClarke18/Brazil_enchentes_2024e https://zenodo.org/records/17855714 . Código geral subjacente para conduzir análise probabilística de atribuição de eventos também está disponível em https://github. com/WorldWeatherAttribution/rwwa.

Recebido: 1º de agosto de 2025; Aceito: 16 de dezembro de 2025;

Referências

1. Porto Alegre experimenta seu início de maio mais chuvoso em 60 anos, segundo o Climatempo. G1 https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/05/12/porto-alegre-tem-inicio-de-maio-mais-chuvoso-em-115-anos-diz-climatempo.ghtml (2024).
2. Brasil: Emergência de enchentes do Rio Grande do Sul: Snapshot #4 Em 07 de julho de 2024 - Brasil | ReliefWeb. https://reliefweb.int/report/brazil/ Brasil-Rio-grande-Do-Sul-FL OOD-Emergency-Snapshot-4-07-Jul-2024 (2024).
3. Trancoso, R., Flores, B. M. & Chapman, S. Desastres naturais mais mortíferos — um alerta sobre as enchentes de 2024 no Brasil. *Ambiente. Reserva. Lett.* 20, 041001 (2025).
4. Mapas. https://erccportal.jrc.ec.europa.eu/ECHO-Products/Maps#/mapas/4868 (2024).
5. Velleda, L. Bairros pobres foram os mais afetados pelas enchentes na capital e na região metropolitana. *Sul 21* https://sul21.com.br/noticias/geral/2024/05/bairros-pobres-foram-os-mais-atingidos-pela-enchente-na-capital-e-regiao-metropolitana/ (2024).
6. Taschetto, A. S. et al. Teleconexões atmosféricas ENSO. Em *El Niño Oscilação do Sul em um Clima em Mudança* 309–335, https://doi.org/10.1002/9781119548164.ch14 (American Geophysical Union (AGU), 2020).
7. Teixeira, M. S. & Satyamurty, P. Características dinâmicas e sinópticas de episódios de chuvas intensas no sul do Brasil. https:// doi.org/10.1175/MWR3302.1 (2007).
8. Teixeira, M. da S. & Satyamurty, P. Tendências na frequência de eventos de precipitação intensa no sul e sudeste do Brasil durante 1960–2004. https://doi.org/10.1175/2011JCLI3511.1(2011).
9. Luiz-Silva, W. Uma visão geral da climatologia da precipitação no Brasil: variabilidade espaço-temporal de frequência e intensidade

associada a sistemas atmosféricos. *Ciência Hidrólica J.* 66, 289–308 (2021). Oscar - Júnior, Antonio Carlos, Cavalcanti, Iracema Fonseca Albuquerque e Treistman, F.

10. Carvalho, L. M. V., Jones, C. & Liebmann, B. A Zona de Convergência do Atlântico Sul: intensidade, forma, persistência e relações com atividade intrasazonal a interanual e precipitação extrema. https://

journals.ametsoc.org/view/journals/clim/17/1/1520-0442_2004_017_0088_tsaczi_2.0.co_2.xml (2004).
11. Marengo, J. A., Soares, W. R., Saulo, C. & Nicolini, M. Climatologia do Jet East dos Andes, de baixa altitude, conforme derivada das reanálises NCEP–NCAR: características e variabilidade temporal. https://journals. ametsoc.org/view/journals/clim/17/12/1520-0442_2004_017_2261_ cotlje_2.0.co_2.xml (2004).
12. Fleischmann et al. As grandes enchentes de 1983 nos grandes rios da América do Sul: uma abordagem continental de modelagem hidrológica. *Ciência Hidrólica J.* 65, 1358–1373 (2020).
13. Ávila, A., Justino, F., Wilson, A., Bromwich, D. & Amorim, M. Tendências recentes de precipitação, enchentes repentinas e deslizamentos de terra no sul do Brasil. *Ambiente. Reserva. Lett.* 11, 114029 (2016).
14. Cai, W. et al. Alterando a oscilação El Niño–Sul em um clima em aquecimento. *Rev. Terra Ambiente Nacional.* 2, 628–644 (2021).
15. Chagas, V. B., Chaffe, P. L., & Blöschl, G. Clima e gestão do solo aceleram o ciclo da água brasileiro. *Comun Natural*. 13, 5136. https://www.nature.com/articles/s41467-022-32580-x (2022).
16. Fernandes, L. G. & Rodrigues, R. R. Mudanças nos padrões de eventos de chuva extrema no sul do Brasil. *Int. J. Climatol.* 38, 1337–1352 (2018).
17. *02 Enchentes do Sul do Brasil* https://www.climameter.org/20240502- Sul-Brasil-Enchentes ClimaMeter—2024/05/.
18. Nas últimas três décadas, o Sul registrou um aumento de até 30% na precipitação média anual. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/nas-ultimas-tres-decadas-sul-registra-aumento-de-ate-30-na-precipitação-media-anual.
19. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). *Mudanças Climáticas 2021 – A Base das Ciências Físicas: Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas*. (Cambridge University Press, https://doi.org/10.1017/9781009157896 (2023).
20. Zaninelli, P. G., Menéndez, C. G., Falco, M., López-Franca, N. & Carril,
A. F. Futuras mudanças hidroclimatológicas na América do Sul baseadas em um conjunto de modelos climáticos regionais. *Clim. Dyn.* 52, 819–830 (2019).
21. Jeferson de Medeiros, F., Prestrelo de Oliveira, C. & Avila-Diaz, A. Avaliação dos índices climáticos de precipitação extrema e suas mudanças projetadas para o Brasil: de CMIP3 para CMIP6. *Clima climático. Extremo.* 38, 100511 (2022).
22. Almazroui, M. et al. Avaliação do desempenho do CMIP6 e das mudanças projetadas de temperatura e precipitação na América do Sul. *Silvicultura da Terra. Arredores.* 5, 155–183 (2021).
23. Alves, L. M., Chadwick, R., Moise, A., Brown, J. & Marengo, J. A. Avaliação da variabilidade da precipitação e mudanças futuras no Brasil ao longo de múltiplas escalas temporais. *Int. J. Climatol.* 41, E1875–E1888 (2021).
24. Mudanças climáticas, El Niño e falhas de infraestrutura por trás de grandes enchentes no sul do Brasil – Atribuição Mundial do Clima. *Atribuição do Clima Mundial* https://www.worldweatherattribution.org/ As mudanças climáticas fizeram as enchentes no sul do Brasil duas vezes- provável/ (2024).
25. Meio Ambiente, Relatório da Lacuna de Emissões da ONU 2024 | PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. https://www.unep.org/resources/ Relatório-Emissões-Gap-2024 (2024).
26. Newman, M. et al. A Oscilação Decenal do Pacífico, Revisitada. https:// doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0508.1 (2016).
27. Otto, F. E. L. et al. Combinando formalmente diferentes linhas de evidência na atribuição de eventos extremos. *Avançado: Climatol. Meteorol. Oceanogr.* 10, 159–171 (2024).
28. Montini, T. L., Jones, C. & Carvalho, L. M. V. O jato de baixa altitude sul-americano: uma nova climatologia, variabilidade e mudanças. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 124, 1200–1218 (2019).
29. Torres-Alavez, J. A. et al. Projeções futuras na climatologia de jatos globais de baixo nível a partir de simulações CORDEX-CORE. *Clim. Dyn.* 57, 1551–1569 (2021).
30. Reboita, M. S. et al. Projeções futuras dos índices climáticos de precipitação extrema na América do Sul com base no conjunto multimodelo CORDEX-CORE. *Atmosfera* 13, 1463 (2022).
31. Blázquez, J. & Silvina, A. S. Variabilidade e extremos da precipitação multiescala sobre a América do Sul: análise de mudanças futuras a partir de um conjunto de simulações do modelo climático regional CORDEX. *Clim. Dyn.* 55, 2089–2106 (2020).
32. Shepherd, T. G. et al. Enredos: uma abordagem alternativa para representar a incerteza nos aspectos físicos das mudanças climáticas. *Clim. Change* 151, 555–571 (2018).
33. Mastrandrea, M. D. et al. A nota de orientação AR5 do IPCC sobre o tratamento consistente das incertezas: uma abordagem comum entre os grupos de trabalho. *Clim. Change* 108, 675 (2011).
34. Redator. Núcleo Porto Alegre analisa os impactos das enchentes na população pobre e negra do Rio Grande do Sul. *Observatório das Metrópoles* https://www.observatoriodasmetropoles.net.br/nucleo-porto-alegre-analisa-os-impactos-das-enchentes-na-população-pobre-e-negra-do-rio-grande-do-sul / (2024).
35. Enchentes afetaram 3.000 unidades de saúde no Rio Grande do Sul- Brasil | ReliefWeb. *ReliefWeb* https://reliefweb.int/report/brazil/ enchentes afetaram-3000-unidades-de-saúde-rio-grande-do-sul (2024).
36. As chuvas no Rio Grande do Sul afetaram 8.000 indígenas. *Agência Brasil* https://agenciabrasil.ebc.com.br/en/geral/noticia/2024-05/rains-rio-grande-do-sul-have-afected-8000-indígenas-pessoas (2024).
37. Dourado, M. Enchentes já afetaram mais de 80 comunidades indígenas no Rio Grande do Sul; descubra como ajudar. | CIMI. https:// cimi.org.br/2024/05/indigenascheiars/ (2024).
38. ABRHidro - ANAIS - Aplicação preliminar do modelo hidrológico MGB-IPH para a análise do evento de inundação extrema de 1941 no estado do Rio Grande do Sul. https://anais.abrhidro.org.br/job.php? Jó=3761 (2018).
39. Possa, T. M., Collischonn, W., Jardim, P. F. & Fan, F. M. Simulação hidrológica e análise hidrodinâmica da possível influência do vento na inundação extraordinária de 1941 em Porto Alegre. *RBRH* 27, e29 (2022).
40. Allasia, D. G., Tassi, R., Bemfica, D. & Goldenfum, J. A. Diminuição da percepção do risco de enchentes em Porto Alegre – Brasil e sua influência nas decisões de gestão de recursos hídricos. Nos *Anais da IAHS.* vol. 370 189–192 (Copernicus GmbH, 2015).
41. Brasil, D.-L. A responsabilidade da Prefeitura pela catástrofe de Porto Alegre. *Desvinculando o Brasil* https://bmier.substack.com/p/city-halls-responsabilidade-por-o (2024).
42. Prizibisczki, C. Rio Grande do Sul perdeu 22% de sua cobertura vegetal nas últimas décadas. *((o))eco* https://oeco.org.br/reportagens/rio-grande-do-sul-perdeu-22-de-

sua-cobertura-vegetal-nas-ultimas-decadas / (2024).
43. Oliveira, E. Rain in Rio Grande do Sul: o que as águas turvas que varrem tudo sinalizam? *((o))eco* https://oeco.org.br/ reportagens/chuvas-no-rio-grande-do-sul-o-que-as-aguas-barrentas-que-tudo-arrastam-sinalizam / (2024).
44. Etchelar, C. B., Gruber, N. L. S. & Brenner, V. C. Os impactos causados por canais de drenagem em áreas úmidas do rio Gravataí. – Rio Grande do Sul - Brasil e na praia da Coronilha – Rocha – Uruguai. *Sétima Ed*. https://sevenpublicacoes.com.br/index.php/editora/article/view/3626 (2023).
45. Temporais No RS: A Defesa Civil emite 'orientação expressa' para a evacuação de áreas de risco no Vale de Taquari. *G1* https://g1.globo. com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/05/01/temporais-no-rs-defesa-civil-vale-do-taquari.ghtml (2024).
46. O Rio Grande do Sul emitiu um alerta de chuva forte, relâmpagos e risco de inundação, segundo a Defesa Civil. *G1* https://g1.globo. com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/04/22/rs-tem-alerta-para-chuvas-fortes-descargas-eletricas-e-risco-de-alagamentos-diz-defesa-civil.ghtml (2024).
47. Sornette, D. & Ouillon, G. Reis-dragão: mecanismos, métodos estatísticos e evidências empíricas. *Eur. Física J. Espetacular Top.* 205, 1–26 (2012).
48. Tragédia no Rio Grande do Sul: diferença entre enchente, inundação e inundação. *Brasil Escola* https://brasilescola.uol.com.br/noticias/ tragedia-no-rs-entenda-a-diferenca-entre-enchente-inundacao-e- alagamento/3131313.html.
49. Enchentes no Rio Grande do Sul: o que causou a enchente de 1941 em Porto Alegre — e por que não é um argumento para negar as mudanças climáticas. *BBC News Brasil* https://www.bbc.com/portuguese/articles/ CV27272ZD79O (2024).
50. Diplomata, T. W. Enchentes históricas no estado brasileiro do Rio Grande do Sul. *O Diplomata da Água* https://www.waterdiplomat.org/story/ 2024/05/historic-enchentes-brazilian-state-rio-grande-do-sul (2024).
51. Stocks, C. Barragem da usina 14 de Julho, no Brasil, colapsa parcialmente. *Energia Hídrica Internacional* https://www.waterpowermagazine.com/ Notícias/Usina-Hidrelétrica da Barragem 14-de-Julho no Brasil-Parcialmente desaba-fatalidades - relatadas - 11737530/ (2024).
52. O número de mortos do sul do Brasil sobe para 78, com muitos desaparecidos | Notícias de Enchentes | Al Jazeera. *Al Jazeera* https://www.aljazeera.com/ Galeria/2024/05/6/Mortes-do-sul-Brasil-Chuva-Aumenta-com- muitos-ainda desaparecidos.
53. Resgates 'desesperados' em andamento enquanto enchentes no Brasil matam 90 pessoas e deslocam milhares | Notícias de Enchentes | Al Jazeera. *Al Jazeera* https://www. aljazeera.com/news/2024/5/7/desperate-rescues-under-way-as-Brasil-enchentes-mata-90-milhares-deslocados-milhares (2024).
54. Fato, B. de. O número de mortos por enchentes no Rio Grande do Sul sobe para 90, afetando mais de 1 milhão de pessoas. *Despacho do Povo* https:// peoplesdispatch.org/2024/05/07/death-toll-from-enchentes-in-rio-grande- Sul-sobe-para-90 afetando-mais-de-1-1 milhão-de-pessoas/ (2024).
55. Egas, H. M. et al. Inventário abrangente e avaliação inicial dos deslizamentos de terra desencadeados pelas chuvas do outono de 2024 no Rio Grande do Sul, Brasil. *Deslizamentos* de terra 22, 579–589 (2025).
56. Brasil, o Aeroporto Internacional Porto Alegre–Salgado Filho reabriu hoje. https://www.avionews.it/item/1260689-brazil-porto-alegre-salgado-filho-international-airport-reopened-today.html (2024).
57. Enchentes no estado brasileiro do Rio Grande do Sul desestabilizam a cadeia de suprimentos. *Inteligência Global de Mercado S&P* https://www.spglobal.com/market-Inteligência/EN/Notícias-Insights/Pesquisa/Inundações-Em-Brasil-Rio-Grande- do-sul-estado-interromper-cadeia de suprimentos (2024).
58. Brasil: Enchentes sem precedentes no Rio Grande do Sul ameaçam a produção agrícola do Brasil (16 de maio de 2024) - Brasil | ReliefWeb. https://reliefweb.int/report/brazil/brazil-unprecedented-FLOods- rio-grande-do-sul-threaten-brasils-agricultural-output-mai-16- 2024 (2024).
59. Enchentes do Rio Grande do Sul Brasil em 2024. *Centro de Filantropia em Desastres* https://disasterphilanthropy.org/disasters/2024-rio- Grande-do-Sul-Brasil-Enchentes/ (2024).
60. MapBiomas Brasil. https://brasil.mapbiomas.org/en/2023/10/20/em-38-anos-o-Brasil-perdeu-15-de-Suas-Florestas-Naturais/.
61. Martinbiancho, G. K. et al. Aplicação preliminar do modelo hidrológico MGB-IPH para a análise do evento de enchente extrema em 1941 no estado do Rio Grande do Sul.
62. Beck, H. E. et al. MSWEP V2 Precipitação Global a 3 Horas 0,1°: Metodologia e Avaliação Quantitativa. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 100, 473–500 (2019).
63. Funk, C. et al. Os riscos climáticos da precipitação infravermelha com estações —um novo recorde ambiental para monitoramento de extremos. *Sci. Data* 2, 150066 (2015).
64. Markus, Z. et al. GPCC Full Data Daily Version 2022 a 1,0°: Precipitação Diária de Superfície de Terra a partir de Pluviômetros baseados em GTS e Dados Históricos: Totais Diários Globalmente Gradeados. aprox. 25 MB por arquivo gzip Centro Global de Climatologia da Precipitação (GPCC, http://gpcc. dwd.de/) no Deutscher Wetterdienst https://doi.org/10.5676/DWD_ GPCC/FD_D_V2022_100 (2022).
65. Xavier, A. C., Scanlon, B. R., King, C. W. & Alves, A. I. Novos dados diários brasileiros aprimorados em grade climática (1961–2020). *Int. J. Climatol.* 42, 8390–8404 (2022).
66. Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M. & Lo, K. Mudança global da temperatura superficial. *Rev. Geophys*. 48 (2010).
67. Lenssen, N. J. L. et al. Melhorias no Modelo de Incerteza GISTEMP. *J. Geophys. Res. Atmos.* 124, 6307–6326 (2019).
68. van Oldenborgh, G. J. et al. Definindo índices de El Niño em clima em aquecimento. *Ambiente. Reserva. Lett.* 16 de 044003 (2021).
69. Philip, S. e outros. Um protocolo para análises probabilísticas de atribuição de eventos extremos. *Avançado: Climatol. Meteorol. Oceanogr.* 6, 177–203 (2020).
70. Giorgi, F., Coppola, E., Teichmann, C. & Jacob, D. Editorial para o Experimento CORDEX-CORE Edição Especial I. *Clim. Dyn.* 57, 1265–1268 (2021).
71. Giorgi, F. Redução Dinâmica Regional e a Iniciativa CORDEX. *An. Rev. Environ. Ressauda.* 40, 467–490 (2015). & Jr, W. J. G.
72. Eyring, V. et al. Visão geral do projeto experimental Phase 6 (CMIP6) do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP6). *Geosci. Desenvolvimento de modelos.* 9, 1937–1958 (2016).
73. Vecchi, G. A. et al. Sobre a previsão sazonal da atividade regional de ciclones tropicais. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00158.1 (2014).
74. Chan, D., Vecchi, G. A., Yang, W. & Huybers, P. Simulação aprimorada da frequência de furacões no Atlântico Norte dos séculos XIX e XX após corrigir as temperaturas históricas da superfície do mar. *Ciência Avançada* 7, (2021).
75. Yang, W., Hsieh, T.-L. & Vecchi, G. A. Ciclo anual de furacões controlado tanto por sementes quanto pela probabilidade de gênese. *Proc. Natl. Acad. Sci. EUA.* 118, e2108397118 (2021).
76. Taylor, K. E., Stouffer, R. J. & Meehl, G. A. Uma visão geral do CMIP5 e do desenho do experimento. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-

00094. 1 (2012).
77. Delworth, T. L. et al. Clima simulado e mudanças climáticas no modelo climático acoplado de alta resolução GFDL CM2.5. https://doi.org/ 10.1175/JCLI-D-11-00316.1 (2012).
78. Rayner, N. A. et al. Análises globais da temperatura da superfície do mar, gelo marinho e temperatura do ar marinho noturno desde o final do século XIX. *J. Geophys. Res. Atmos.* 108 (2003).
79. van Oldenborgh, G. J. et al. Caminhos e armadilhas na atribuição de eventos extremos. *Clim. Change* 166, 13 (2021).
80. Ciavarella, A. et al. Calor prolongado da Sibéria em 2020 quase impossível sem influência humana. *Clim. Change* 166, 9 (2021).
81. Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M. & Parsons, D. B. O caráter mutável da precipitação. https://doi.org/10.1175/BAMS-84-9-1205 (2003).
82. O'Gorman, P. A. & Schneider, T. A base física para o aumento dos extremos de precipitação em simulações das mudanças climáticas do século XXI. *Proc. Acad. Sci.* 106, 14773–14777 (2009).
83. Stein, A. F. et al. Sistema de modelagem de transporte atmosférico e dispersão HYSPLIT da NOAA. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 96, 2059–2077 (2015).
84. Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M. & Francis, R. C. Uma oscilação climática interdecenal no Pacífico com impactos na produção de salmão. *Bull Am. Meteor. Soc.* 78, 1069–1079 (1997).

Agradecimentos

Este projeto recebeu financiamento do programa de pesquisa e inovação Horizon 2020 da União Europeia, sob o acordo de subvenção nº 101003469.

Contribuições de autores

B.C., C.B., R.R., M.Z., L.A. e F.O. escreveram as seções de risco do manuscrito. M.V., K.I., J.B. e M.M. compilaram os impactos e escreveram/revisaram o contexto de vulnerabilidade e exposição. A Colúmbia Britânica produziu os números, realizou análises de dados e liderou todas as revisões. C.B e M.Z. forneceram suporte à análise de dados, e W.Y. forneceu dados adicionais de modelos. Todos os autores, incluindo R.H., I.P., G.V., J.K., S.P. e S.K., estiveram envolvidos na concepção do estudo e na revisão do manuscrito.

Interesses concorrentes

Os autores declaram não haver interesses concorrentes.

Informações adicionais

Informações suplementares A versão online contém material suplementar disponível em https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8.

Correspondência e pedidos de materiais devem ser endereçados a Ben Clarke.

Reimpressões e informações sobre permissões estão disponíveis em http://www.nature.com/reprints
Nota do editor: A Springer Nature permanece neutra em relação às reivindicações jurisdicionais em mapas publicados e afiliações institucionais.
Acesso Aberto Este artigo está licenciado sob uma Licença Creative Commons Attribution 4.0 International, que permite uso, compartilhamento, adaptação, distribuição e reprodução em qualquer meio ou formato, desde que você dê o devido crédito ao(s) autor(es) original(es) e à fonte, forneça um link para a licença Creative Commons e indique se mudanças foram feitas. As imagens ou outros materiais de terceiros neste artigo estão incluídos na licença Creative Commons do artigo, salvo indicação em contrário em uma linha de crédito ao material. Se o material não estiver incluído na licença Creative Commons do artigo e seu uso pretendido não for permitido por regulamento estatutário ou exceder o uso permitido, você precisará obter permissão diretamente do detentor dos direitos autorais. Para ver uma cópia disso
Licença, visite http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.

© O(s) Autor(es) 2026

POR TRADUÇÃO CONFORME:
Rio de Janeiro, 25 de junho de 2026.

gov.br
Documento assinado digitalmente
ANELISE PACHECO
Data: 25/06/2026 18:07:34-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO11, Página 1

Da mudança climática à responsabilidade: a ciência da atribuição dos eventos extremos

Prof. Paulo Artaxo

Instituto de Física da Universidade de São Paulo e membro do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) da ONU

A exploração e o uso de combustíveis fósseis são a principal fonte de emissões antropogênicas de gases de efeito estufa e o principal motor do aquecimento global observado nas últimas décadas, de acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (IPCC, 2023). Mesmo antes dos relatórios do IPCC, tivemos a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, em Estocolmo, em junho de 1972, marco da cooperação ambiental. Nesta conferência, a ciência alertou a humanidade sobre a gravidade das mudanças climáticas e das consequências das emissões de gases de efeito estufa. Segundo a Organização Meteorológica Mundial, a temperatura média global próxima à superfície em 2023 foi 1,45 ± 0,12 °C superior à média de 1850–1900 (WMO, 2024). Um dos aspectos mais importantes do aquecimento global é o aumento da frequência e da intensidade dos eventos climáticos extremos, como as enchentes que assolaram o Rio Grande do Sul em 2024, as secas no Brasil central e na Amazônia e a intensificação das ondas de calor em muitas regiões do país.

1 - Dos combustíveis fósseis ao aquecimento global e aos eventos extremos

É importante observarmos a sequência científica necessária para discutir a questão da atribuição dos eventos climáticos extremos aos combustíveis fósseis. O ponto inicial é a emissão antropogênica de gases de efeito estufa, com destaque para a cadeia de combustíveis fósseis, ilustrada na figura 1 abaixo. O aumento das concentrações atmosféricas desses gases resulta de atividades humanas, com contribuições distintas conforme o gás. Para o CO_2 (dióxido de carbono), destacam-se a queima de combustíveis fósseis, os processos industriais e as mudanças no uso da terra. Para o CH_4 (metano), são relevantes as emissões provenientes da cadeia de combustíveis fósseis, da agropecuária e dos resíduos. Para o N_2O (óxido nitroso), as emissões do setor agrícola predominam.

Estas emissões de gases de efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono e o metano, fizeram com que a concentração destes gases, que controlam o efeito estufa, tenha aumentado significativamente nas últimas décadas, como mostra a figura 2. As concentrações de CO2 aumentaram 152% em relação aos valores de 1850, enquanto o

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO11, Página 2

metano aumentou 266% no mesmo período. Ou seja, estamos alterando a composição da atmosfera terrestre.

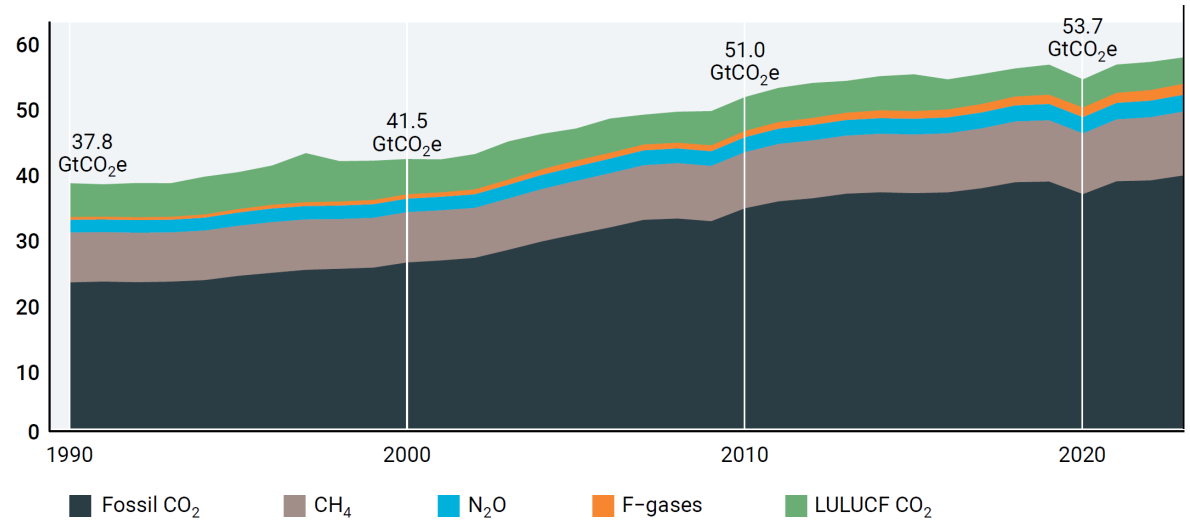


Figura 1 — Emissões líquidas antropogênicas globais de gases de efeito estufa entre 1990 e 2023, discriminadas por categoria. Valores expressos em $GtCO_2e$ (equivalentes) por ano. Fonte: PNUMA, Emissions Gap Report 2024, Figura 2.1.

Estas emissões de gases de efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono (CO2) e o metano (CH_4), fizeram com que a concentração destes gases, que controlam o efeito estufa, tenha aumentado significativamente nas últimas décadas, como mostra a figura 2.

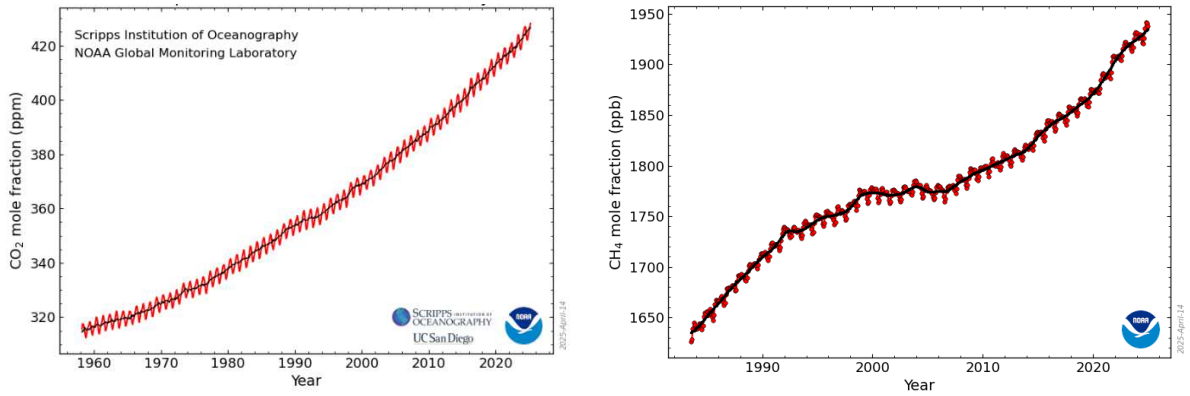


Figura 2 — Evolução das concentrações atmosféricas de CO_2 em Mauna Loa (à esquerda) e da concentração média global de CH_4 (à direita). As séries ilustram o aumento da concentração desses gases na atmosfera, cujas fontes e mecanismos de remoção diferem. Fontes: Scripps Institution of Oceanography e NOAA Global Monitoring Laboratory, conforme indicado nos painéis.

Este aumento da concentração de gases de efeito estufa eleva a temperatura da atmosfera terrestre. Este efeito, chamado de “efeito estufa”, foi descrito pelo físico sueco Svante Arrhenius, que publicou, em 1896, um estudo pioneiro que quantificou a influência de mudanças na concentração de CO_2 sobre a temperatura de nosso

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO11, Página 3

planeta. A figura 3 ilustra o aumento da temperatura atmosférica ao longo das últimas décadas. Nosso planeta se aqueceu, em média, em 2023, cerca de 1,45 ± 0,12 graus Celsius em relação a 1850-1900, de acordo com a Organização Meteorológica Mundial (WMO 2024).

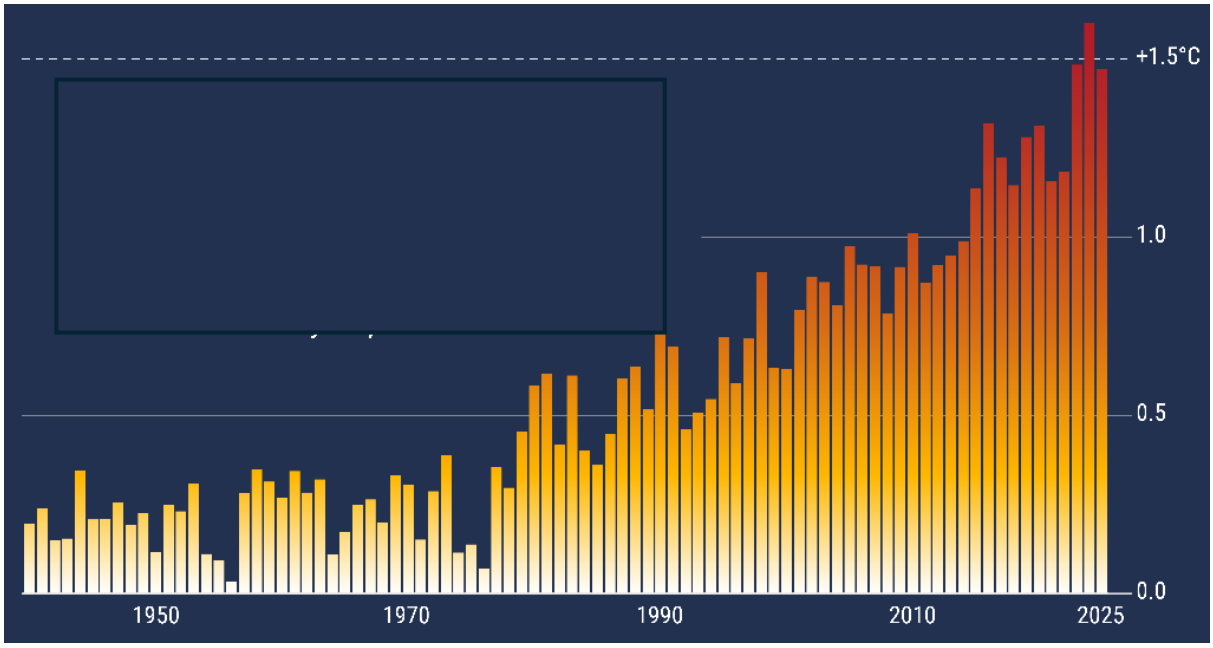


Figura 3 - Evolução da temperatura média da atmosfera do nosso planeta ao longo das últimas décadas (fonte: Copernicus, 2026).

Uma das consequências deste acelerado aquecimento global é o aumento da frequência e da intensidade dos eventos climáticos extremos. Isso está muito bem documentado em relatórios do IPCC e da World Meteorological Organization (WMO). A figura 4 ilustra o número de eventos climáticos extremos observados de 1980 a 2017, evidenciando o aumento da frequência desses eventos, como secas e inundações de grande porte, nas últimas décadas. A figura apresenta registros de eventos naturais associados a perdas. Sua evolução deve ser interpretada considerando as mudanças na exposição, na cobertura dos registros e nos critérios de contabilização. A atribuição científica da mudança na probabilidade ou na intensidade desses eventos ao aquecimento global é feita por meio de métodos específicos de detecção e atribuição, e não apenas pela evolução das séries de registros.

A Figura 4 apresenta a evolução dos registros de eventos naturais associados a perdas entre 1980 e 2017. O aumento desses registros deve ser interpretado considerando mudanças na exposição, na cobertura das informações e nos critérios de contabilização. A atribuição de mudanças na frequência ou na intensidade dos perigos meteorológicos requer análises específicas. Hoje já é possível estimar em que medida o aquecimento provocado pela queima de combustíveis fósseis alterou a probabilidade e a intensidade de determinados eventos extremos. Esta área de pesquisa chama-se “**Ciência da Atribuição Climática**”. Cada vez mais, é fundamental para nossa

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO11, Página 4

sociedade atribuir os impactos de eventos climáticos extremos às fontes de emissão de gases de efeito estufa, principalmente à produção e ao uso de combustíveis fósseis.

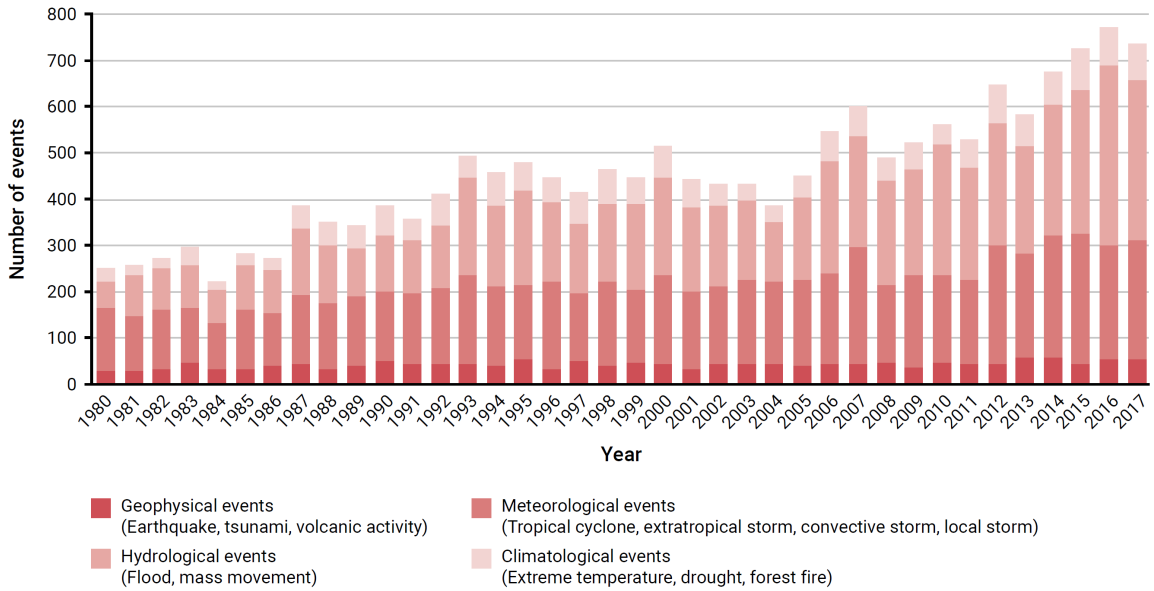


Figura 4 — Número de registros de eventos naturais associados a perdas entre 1980 e 2017, discriminados por categoria. A evolução dos registros deve ser interpretada considerando as mudanças na exposição, na cobertura e nos critérios de contabilização. Fonte indicada na imagem: Munich Re (2017).

É muito importante salientar **o papel inerente das incertezas no método científico**. A incerteza integra o método científico: reconhecer os limites das observações, dos modelos e das interpretações faz parte da construção do conhecimento. Ao testar hipóteses e confrontar resultados, a ciência procura caracterizar e reduzir essas incertezas. Uma conclusão pode ser robusta mesmo quando persistem questões sobre a magnitude de um fenômeno ou sobre seus detalhes. Para comunicar essas nuances, o IPCC utiliza uma linguagem padronizada que distingue entre o nível de confiança nas conclusões e a probabilidade de determinado resultado. O nível de confiança expressa uma avaliação da qualidade, da quantidade e da consistência das evidências disponíveis, bem como do grau de concordância entre elas; a probabilidade fornece uma expressão quantitativa da incerteza. Ao explicitar tais distinções, o IPCC torna mais transparentes tanto a solidez quanto os limites do conhecimento avaliado. Reconhecer a incerteza, portanto, é uma expressão de rigor científico e permite fundamentar decisões nas melhores evidências disponíveis, mesmo na ausência de certeza. É importante salientar que o IPCC, em sua última compilação no Atlas Interativo do AR6, utilizou 35 modelos climáticos diferentes do CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project – Phase 6). Isso contribui para uma robustez significativa nos resultados do conjunto de simulações dos modelos climáticos.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO11, Página 5

Outro mecanismo importante de avaliação do conhecimento científico é a r**evisão por pares,** na qual especialistas da área examinam em detalhes um manuscrito antes de sua publicação. Nesse processo, os revisores avaliam a adequação dos métodos, a consistência dos dados e das análises e o respaldo das conclusões nas evidências apresentadas, podendo solicitar esclarecimentos, correções ou análises adicionais. O número de revisores e os procedimentos variam entre as revistas, e a decisão final sobre a publicação cabe à editoria, com base nos pareceres recebidos. A revisão por pares contribui para o rigor, a clareza e a credibilidade da literatura científica. Essa avaliação prossegue após a publicação, quando os resultados podem ser examinados, contestados e testados por outros pesquisadores. Este procedimento confere robustez aos artigos publicados.

2 - O evento climático do Rio Grande do Sul

As cheias no Rio Grande do Sul em abril e maio de 2024 foram marcantes pela combinação de eventos e pela dimensão geográfica e humana dos impactos. A ciência atmosférica mostra que o evento apresentou uma série de aspectos importantes, entre eles a ocorrência de um El Niño significativo acoplado a um bloqueio atmosférico persistente, baixa pressão sobre o sul da América do Sul, forte transporte de umidade e um padrão semelhante ao de um rio atmosférico, com contribuição importante de umidade proveniente da região amazônica.

É importante salientar que eventos de desastres, como as enchentes no Rio Grande do Sul, mostram que a dimensão das perdas também é determinada por ocupação territorial inadequada, desigualdade social, infraestrutura de proteção precária, governança e vulnerabilidade. Estes fatores se somam aos impactos das mudanças climáticas. O evento afetou diretamente centenas de milhares de pessoas, e mais de 10.000 km^2 foram inundados, causando prejuízos financeiros e sociais imensos.

Uma extensa área foi afetada, como ilustra a Figura 5. A área apresentada na Figura 5 abrange a bacia de contribuição ao Guaíba, incluindo o Jacuí e tributários como Vacacaí, Pardo e Taquari, além das bacias dos rios Caí, Sinos e Gravataí.

As áreas mais densamente ocupadas incluem a região metropolitana de Porto Alegre (RMPA), composta por 34 municípios, onde vivem cerca de 4,1 milhões de pessoas, o que representa uma parcela significativa dos 11 milhões de habitantes do estado.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO11, Página 6

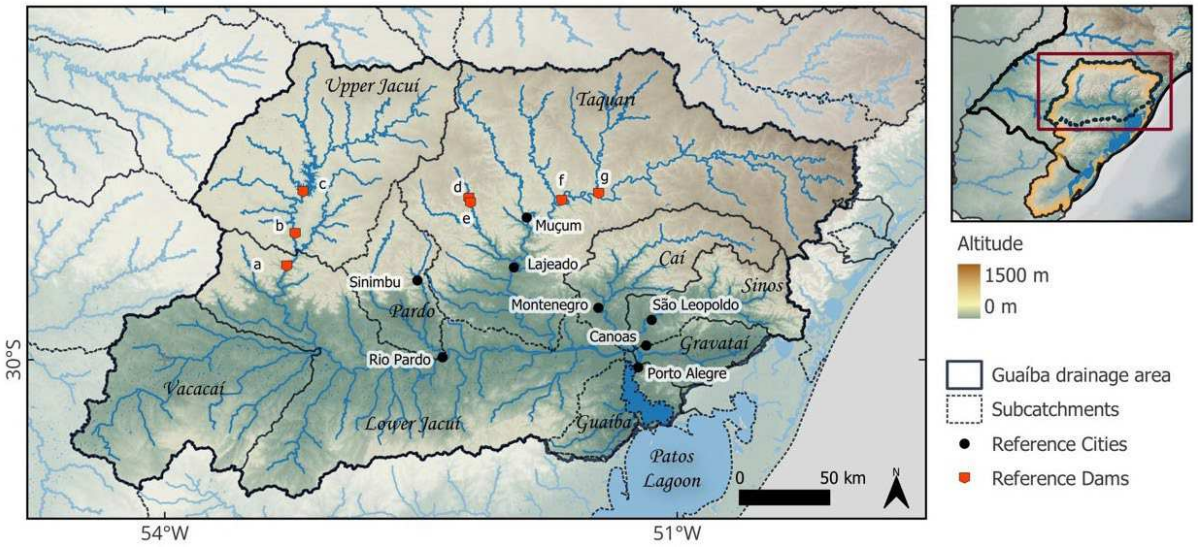


Figura 5 – Ilustração das bacias, sub-bacias, do relevo e das localidades de referência na área estudada pelo evento climático de abril e maio de 2024. Figura de Collischonn et al., 2025.

Muitos trabalhos meteorológicos analisaram os fatores que levaram à ocorrência do evento, entre eles o de Walter Collischonn e outros (Collischonn et al., 2025). O trabalho mostra que o evento se destacou pela escala espaço-temporal sem precedentes na história hidrológica recente do país, caracterizando-se por cheias simultâneas em bacias hidrográficas de diferentes dimensões e no sistema da Laguna dos Patos, além de deslizamentos em larga escala e falhas nos sistemas de contenção.

Em termos de precipitação, análises da Universidade Federal do Rio Grande do Sul indicam que a chuva mais intensa ocorreu entre 29 de abril e 5 de maio. Tivemos também, entre 11 e 12 de maio, outra chuva intensa na região. Uma das estações meteorológicas do CEMADEN (CEMADEN código 432026301A) registrou 386 mm de chuva entre as 18:00 do dia 29 de abril e as 18:00 do dia 30 de abril. O maior acumulado de precipitação em 48 horas mencionado no estudo foi de 575 mm, registrado próximo à PCH Rastro de Auto, na estação de código ANA 86743800. São valores de precipitação extremamente elevados, o que caracteriza este evento como excepcional, tanto pela precipitação quanto pelos danos e prejuízos socioeconômicos e pelas vidas perdidas. A chuva afetou não apenas a bacia e a região ilustrada na figura 5, mas também cerca de 90% dos municípios do estado, deslocando milhares de pessoas de suas casas. Interrupções em serviços essenciais, como o fornecimento de água e de energia, afetaram milhões de pessoas. Este evento foi classificado como extremamente raro, com um período de retorno estimado entre 100 e 250 anos (World Weather Attribution, 2024).

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO11, Página 7

3 - A Ciência da atribuição climática e responsabilização de danos

Nestas últimas décadas observamos sólidos progressos científicos na chamada "Ciência da atribuição climática". Durante muito tempo, a ciência climática procurou responder a uma pergunta fundamental: quanto das mudanças observadas no clima pode ser atribuído à atividade humana? Hoje, essa pergunta foi respondida e está sendo ampliada. Já não basta saber se as emissões de gases de efeito estufa tornaram uma onda de calor, uma seca ou uma chuva extrema mais prováveis. A ciência começa a investigar uma questão muito mais específica: qual foi a contribuição de determinados emissores para o aumento do risco climático e para os danos decorrentes?

Para o Brasil, essa questão é especialmente relevante. O país já enfrenta enchentes, secas, ondas de calor e incêndios de grande magnitude. O desastre de 2024 no Rio Grande do Sul mostrou que eventos extremos podem provocar perdas econômicas e sociais enormes. Ao mesmo tempo, a ciência mostra que o aquecimento global está alterando as condições que favorecem esses eventos.

A Figura 6 apresenta projeções do IPCC sobre as mudanças na frequência e na intensidade dos extremos de calor em diferentes níveis de aquecimento global. Um extremo de calor que, no clima de referência de 1850–1900, ocorria, em média, uma vez a cada 50 anos, passaria a ocorrer aproximadamente 39,2 vezes nesse intervalo em um mundo 4 °C mais quente. Nesse nível de aquecimento, a intensidade do extremo com período de retorno de 50 anos aumentaria em cerca de 5,3 °C. Em um mundo 2 °C mais quente, a frequência seria aproximadamente 13,9 vezes maior, enquanto o aumento de intensidade seria de 2,7 °C. Essas estimativas centrais, acompanhadas de intervalos de incerteza na avaliação do IPCC, ilustram como o aquecimento global intensifica os extremos de calor e torna mais frequente a superação de limiares anteriormente raros.

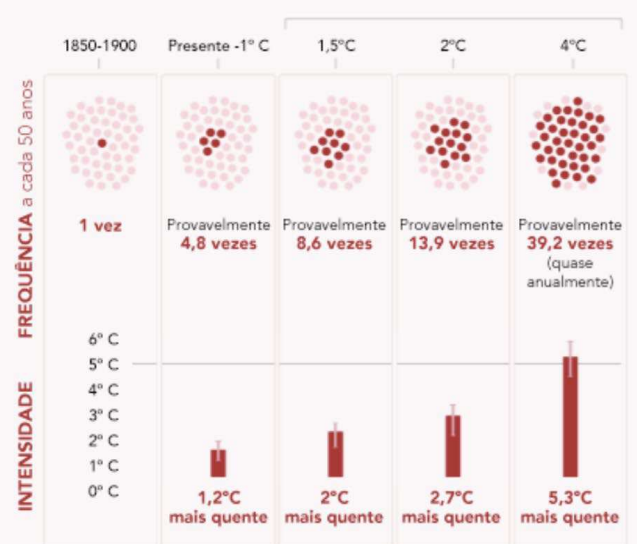


Figura 6a – Mudanças projetadas na frequência e na intensidade dos extremos de calor em diferentes níveis de aquecimento global, em relação ao clima de 1850–1900. Os painéis apresentam extremos com períodos de retorno de 10 e 50 anos no clima de referência. Fonte: adaptado do IPCC, AR6, Grupo de Trabalho I, Sumário para Formuladores de Políticas, Figura SPM.6, 2021.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO11, Página 8

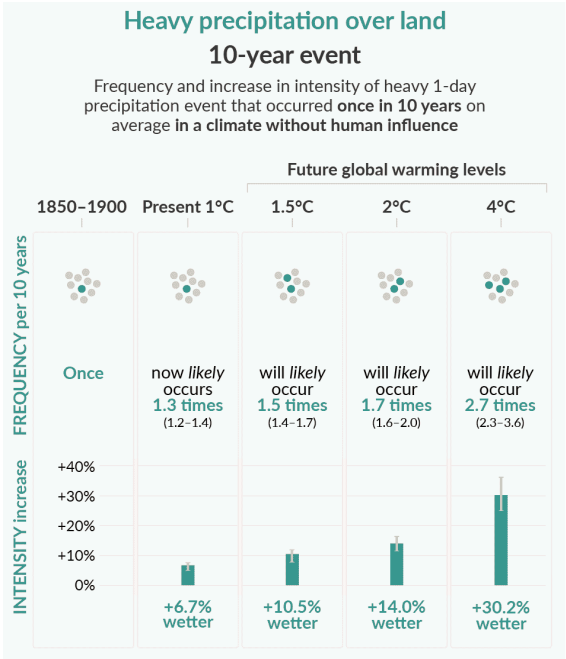


Figura 6b – Frequência e aumento da intensidade de eventos fortes de precipitação que ocorriam, em média, uma vez a cada 10 anos em um clima sem influência humana, para aumentos de temperatura de 1,5, 2 e 4 graus Celsius.

Estes resultados são claros e robustos e ilustram como o aumento da temperatura média global altera a frequência e a intensidade dos extremos de calor. Este aumento de temperatura é resultado das emissões de gases de efeito estufa.

Estes estudos de atribuição receberam um forte impulso em sua base científica em 2014, com a publicação do artigo na revista *Climatic Change* (Heede, 2014). O título deste artigo é expressivo em relação ao seu conteúdo: “Rastreando as emissões de dióxido de carbono e metano antropogênicos para produtores de combustíveis fósseis e de cimento”. Heede desenvolveu uma metodologia para rastrear as emissões históricas de CO_2 e CH_4 até os produtores de petróleo, gás, carvão e cimento. O estudo identificou 90 grandes produtores — os chamados Carbon Majors — aos quais foram atribuídas cerca de 914 $GtCO_2e$, equivalentes a aproximadamente 63% das emissões industriais acumuladas de CO_2 e metano entre 1751 e 2010, segundo a metodologia empregada. Este trabalho foi importante para a mudança do discurso sobre as emissões da humanidade como um todo para as emissões atribuíveis a produtores específicos de combustíveis fósseis. A importância dessa abordagem para a ciência da atribuição é que ela permite deslocar a análise de uma escala exclusivamente nacional ou global para uma escala de emissores identificáveis, possibilitando estimar a contribuição relativa de empresas ou grupos empresariais para o aquecimento observado.

A metodologia descrita por Griffin et al. (2017) considera as emissões operacionais e as associadas ao uso dos combustíveis comercializados, utilizando dados de produção e fatores de emissão padronizados. A metodologia utiliza preferencialmente dados de produção declarados pelas próprias empresas e aplica fatores de emissão padronizados.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO11, Página 9

Callahan e Mankin (2022) trabalharam na atribuição nacional dos danos históricos. Recentemente, em 2025, Callahan e Mankin (2025) realizaram outro importante avanço. Neste trabalho, eles apresentam uma metodologia de "end-to-end attribution", conectando: emissões de empresas → aquecimento global → extremos climáticos → danos econômicos. Neste trabalho, o ponto mais importante é metodológico: os autores argumentam que já é possível estabelecer relações quantitativas entre emissores individuais e determinados danos climáticos.

Em 2026, Callahan publicou na revista *Earth's Future* um importante trabalho que amplia a atribuição da precipitação extrema, além da incidência de ondas de calor. O estudo quantifica em que medida as emissões cumulativas dos produtores de combustíveis fósseis alteraram o risco de extremos de temperatura e de precipitação. A metodologia já foi aplicada a eventos extremos específicos em diferentes partes do mundo. Ele mostra, por exemplo, que a contribuição conjunta dos dez maiores produtores privados considerados na análise aumentou a probabilidade das ondas de calor no noroeste do Pacífico em 2021 em 31% e a probabilidade da precipitação extrema no Paquistão em 2022 em 7%.

4 – Mudanças no El Niño e sua interação com o aquecimento global

O El Niño é a fase quente do fenômeno El Niño–Oscilação Sul (ENOS), de recorrência irregular, caracterizada pelo aquecimento anômalo da superfície do Pacífico equatorial central e oriental e por alterações na circulação atmosférica. Os impactos no Brasil são de secas na Amazônia e região centro-oeste, e chuvas intensas no Sul do Brasil (Wenju Cai, 2020). As enchentes ocorreram em abril e maio de 2024, após um período de El Niño que atingiu forte intensidade no verão de 2023/2024.

Análises recentes publicadas na revista Science em agosto de 2026 mostram que os eventos de El Niño se tornaram mais intensos e frequentes devido às emissões de gases de efeito estufa. O importante trabalho de Cole et al., 2026, indica que o aquecimento dos oceanos, que acompanha o da atmosfera, causado pelas emissões de gases de efeito estufa, tem contribuído para o aumento da intensidade e da frequência dos El Niños. Cole et al. (2026), com base em registros geoquímicos de corais das Galápagos, identificaram um aumento recente da variabilidade interanual da temperatura superficial do Pacífico equatorial oriental, associado a episódios mais intensos de El Niño. Esse resultado amplia as evidências de mudanças no ENSO em um contexto de aquecimento global.

A Figura 7 mostra a evolução da temperatura diária da superfície do mar entre 60°S e 60°N ao longo dos últimos 3 anos, em comparação com a média histórica de 1991-2020. Na série apresentada na Figura 7, a temperatura média diária da superfície do mar entre 60°S e 60°N atingiu 21,10 °C em 22 de agosto de 2026, com base em dados

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO11, Página 10

compilados pelo sistema Copernicus da União Europeia (Copernicus 2026). A emissão de gases de efeito estufa e o consequente aumento da temperatura na atmosfera e nos oceanos podem estar alterando a intensidade dos El Niños e tornando-os mais frequentes.

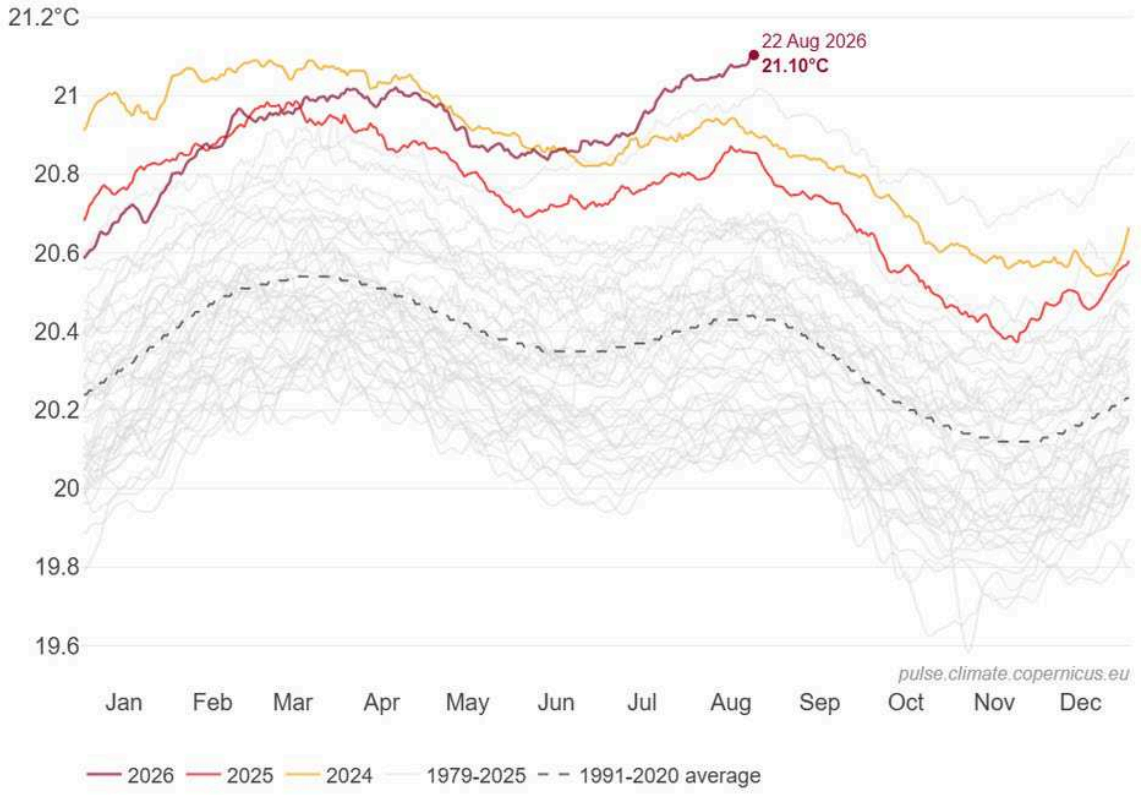


Figura 7 — Temperatura média diária da superfície do mar entre 60°S e 60°N em 2024, 2025 e 2026, comparada à climatologia diária de 1991–2020. Dados: ERA5; crédito: C3S/ECMWF. A série de 2026 apresentada termina em 22 de agosto.

5 - A questão da atribuição das causas do evento climático no Rio Grande do Sul

Hoje já é possível estimar, com um certo grau de incerteza, em que medida o aquecimento provocado pela queima de combustíveis fósseis alterou a probabilidade e a intensidade de determinados eventos extremos. No caso das enchentes do Rio Grande do Sul, estudos de atribuição concluíram que a mudança climática antropogênica tornou a chuva extrema mais provável e mais intensa.

Clarke et al. (2026) investigaram a influência do aquecimento antropogênico e do El Niño na precipitação extrema associada às inundações de 2024. A síntese apresentou estimativas centrais de aproximadamente a duplicação da probabilidade e de um aumento de 12% na intensidade, com intervalos de incerteza de 0,06–4.200 e de −13% a +43%, respectivamente. Esses intervalos incluem ausência de aumento, embora a convergência entre diferentes evidências sustente a interpretação de amplificação da

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO11, Página 11

precipitação. O estudo também identificou contribuição relevante do El Niño, sem estabelecer que seu papel tenha sido menor.

As mudanças na taxa de precipitação decorrentes do aquecimento global mostram um aumento significativo no estado do Rio Grande do Sul ao longo dos últimos anos, com a região de Porto Alegre também registrando aumentos significativos em relação ao passado. Assim, o El Niño atuou como um importante modulador do evento, enquanto o aquecimento antropogênico alterou as condições de fundo que determinaram o risco climático.

O trabalho de Ferreira Neto et al., 2025 mostra que as áreas inundadas chegaram a aproximadamente 10.744 km^2, afetando cerca de 2,3 milhões de pessoas. O trabalho também analisa o papel dos jatos de baixos níveis, do bloqueio atmosférico, do El Niño e do uso inadequado do território. O estudo examina as relações entre precipitação extrema, inundação, exposição e vulnerabilidade.

6 – Considerações finais

A literatura científica examinada sustenta que as emissões antropogênicas alteraram as condições climáticas em que ocorreram as chuvas extremas de 2024 no Rio Grande do Sul. As emissões acumuladas da indústria de combustíveis fósseis contribuíram para o aquecimento global, o que aumentou o risco de eventos extremos de precipitação. Este aquecimento atmosférico e oceânico pode aumentar o risco de precipitação extrema e, em interação com as condições hidrológicas e territoriais, agravar as inundações. Trabalhos recentes mostram que o aquecimento global também intensifica o fenômeno El Niño. A ciência de atribuição desenvolveu métodos para quantificar a contribuição de emissores específicos para esse aumento do risco. É importante salientar que a mudança climática altera o risco meteorológico, mas a transformação de um evento extremo em desastre também depende da exposição e da vulnerabilidade da sociedade. A exposição e a vulnerabilidade não excluem uma contribuição climática para o desastre; esses fatores interagem na produção dos impactos.

As enchentes do Rio Grande do Sul evidenciam, portanto, a necessidade de avançar da atribuição científica do risco climático à quantificação da contribuição de diferentes emissores para os danos associados a eventos extremos. Esse avanço não significa atribuir a uma empresa a totalidade dos danos de um desastre, mas sim quantificar, com métodos científicos e incertezas explicitadas, a parcela do aumento do risco climático associada às emissões acumuladas de diferentes produtores de combustíveis fósseis.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO11, Página 12

As contribuições para as emissões históricas são distribuídas de forma desigual entre os produtores. Os inventários de emissões e os métodos de atribuição oferecem uma base para investigar a contribuição de empresas identificáveis para as alterações no risco climático. A quantificação dessa contribuição para os danos de 2024 requer uma análise específica que conecte emissões, precipitação, inundação e perdas.

As emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, dominadas pelo uso de combustíveis fósseis, contribuíram para o aquecimento global que alterou as condições de ocorrência de eventos extremos de precipitação. A etapa seguinte consiste em quantificar quanto desse aumento de risco pode ser associado às emissões acumuladas de produtores específicos de combustíveis fósseis.

O art. 225 da Constituição estabelece o direito de todos ao meio ambiente ecologicamente equilibrado e impõe ao Poder Público e à coletividade o dever de protegê-lo para as presentes e futuras gerações. O § 3º estabelece, ainda, que as atividades lesivas ao meio ambiente sujeitam os infratores a sanções e à obrigação de reparar os danos.

O aquecimento atual representa riscos importantes à saúde, aos ecossistemas e às atividades econômicas. Seus efeitos sobre precipitações extremas, secas e inundações variam conforme a região, o fenômeno e as condições de exposição e de vulnerabilidade. A avaliação desses efeitos, combinada aos inventários de emissões, oferece uma base científica para investigar a contribuição de produtores específicos para as alterações no risco e nos danos.

Referencias

Callahan, C. W. & Mankin, J. S. (2022). National attribution of historical climate damages. Climatic Change, 172, 40. https://doi.org/10.1007/s10584-022-03387-y .

Callahan, C. W. (2026). Extreme Heat and Rainfall Risk Attributed to Cumulative CO_2 Emissions From Fossil Fuel Producers. Earth's Future. https://doi.org/10.1029/2026EF008278.

Callahan, C. W., & Mankin, J. S. (2025). Carbon majors and the scientific case for climate liability. Nature, 640, 893–901. DOI: 10.1038/s41586-025-08751-3.

Clarke, B., Barnes, C., Rodrigues, R. et al. (2026). Climate change and El Niño behind extreme precipitation leading to major floods in southern Brazil in 2024. npj Natural Hazards, 3, Article 4. https://doi.org/10.1038/s44304-025-00162-8.

Climate Analytics (2023). Carbon majors' trillion-dollar damages: The case for contributions from fossil wealth to loss and damage finance. Novembro 2023.

Cole, J. E. et al., Recent strengthening of eastern Pacific ENSO in the last millennium paleorecord. Science 2026. PMID: 42658966, doi: 10.1126/science.ady2660.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO11, Página 13

Collischonn et al., 2025. The exceptional hydrological disaster in southern Brazil during April-May 2024. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos,* https://doi.org/10.1590/2318-0331.302520240119.

Copernicus 2026: https://marine.copernicus.eu/pt/ocean-climate-portal/sea-surface-temperature

Ferreira Neto, J. B., Freitas, M. S., Simões, P. S. M. et al. (2025). Impact of April and May 2024 extreme precipitation on flooding in Rio Grande do Sul, Brazil. Urban Climate, 61, 102487. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102487.

Griffin, P., Heede, R. & van der Vlugt, I. (2017). The Carbon Majors Database: Methodology Report 2017. CDP Worldwide/Climate Accountability Institute.

Heede, R. (2014). Tracing anthropogenic carbon dioxide and methane emissions to fossil fuel and cement producers, 1854–2010. Climatic Change, 122, 229–241. https://doi.org/10.1007/s10584-013-0986-y .

IPCC 2023 AR6 Climate Change 2023: Synthesis Report. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/

PNUMA UNEP 2024, Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! DOI Identifier: DOI 10.59117/20.500.11822/46404.

IPCC/WGI 2021 - The IPCC AR6 Working Group I Report (Climate Change 2021: The Physical Science Basis). https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/

Wenju Cai, J. Marengo et al., 2020, Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. Nature Reviews Earth & Environment, Vol. 1, n. 4, Pgs. 215-231, 2020.

World Weather Attribution, 2024, https://www.worldweatherattribution.org/2024/.

WMO 2024, Press release. https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2023-smashes-global-temperature-record .



Prof. Paulo Artaxo

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 1

UN environment programme

Limiting overshoot

Navigating exceedance of 1.5°C and pathways towards return



Copyright and disclaimer

© 2026 United Nations Environment Programme

ISBN: 978-92-807-4301-2
Job number: DTI/2783/NA
DOI: https://doi.org/10.59117/20.500.11822/49857

This publication may be reproduced in whole or in part and in any form for educational or non-profit services without special permission from the copyright holder, provided acknowledgement of the source is made. The United Nations Environment Programme would appreciate receiving a copy of any publication that uses this publication as a source. No use of this publication may be made for resale or any other commercial purpose whatsoever without prior permission in writing from the United Nations Environment Programme. Applications for such permission, with a statement of the purpose and extent of the reproduction, should be addressed to unep-communication-director@un.org.

Disclaimers

The designations employed and the presentation of the material in this publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations concerning the legal status of any country, territory, city or area of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

Mention of firm names and commercial products in this document does not imply endorsement by the United Nations Environment Programme or the authors. The use of information from this document for publicity or advertising is not permitted. Trademark names and symbols are used in an editorial fashion with no intention of infringement of trademark or copyright laws.

© Maps, photos and illustrations as specified

Suggested citation

United Nations Environment Programme (2026). *Limiting Overshoot: Navigating exceedance of 1.5°C and pathways towards return*. Nairobi. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/49857

Production: Nairobi

URL: https://www.unep.org/resources/limiting-overshoot-navigating-exceedance

Cover design: Beverley McDonald.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 3

Acknowledgements

The United Nations Environment Programme (UNEP) would like to recognize the strategic direction and coordination provided by the core team in the development of this report:

Mirey Atallah (UNEP), Richard A. Betts (University of Exeter and Met Office), David Dodman (Institute for Housing and Urban Development Studies [IHS], Erasmus University Rotterdam), Sharon Gil (UNEP), Bruce Hewitson (University of Cape Town [UCT]), Lena Kopetzky (UNEP), Nicolien de Lange (UNEP), Lucas Nessim Snaije (IHS), Michael Logan (UNEP), Debra C. Roberts (University of KwaZulu-Natal, South Africa and University of Twente, Kingdom of the Netherlands)

Most importantly, UNEP extends its gratitude to the members of the Scientific Advisory Board, the coordination liaisons, the lead and contributing authors, and the reviewers for their contributions to the preparation of this report. Authors and reviewers have contributed to the report in their individual capacities. Their affiliations are only mentioned for identification purposes.

Chapter Teams:

Executive Summary: Michael Logan (UNEP)

Introduction

Mirey Atallah (UNEP), David Dodman (IHS), Kristie L. Ebi (University of Washington, United States of America), Sharon Gil (UNEP), Elisabeth Gilmore (Carleton University, Canada), Paula A. Harrison (UK Centre for Ecology & Hydrology [UKCEH]), United Kingdom), Bruce Hewitson (UCT, South Africa), Zelina Zaiton Ibrahim (Universiti Putra Malaysia, Malaysia), Mariam Saleh Khan (Weather and Climate Services, Pakistan and Climate Analytics, Germany), Lena Kopetzky (UNEP), Nicolien de Lange (UNEP), Anita Lazurko (UKCEH, United Kingdom), Li-Jing Liu (Beijing Institute of Technology, China), Shobha Maharaj (University of Fiji, Fiji), Adrienne Marshall (Colorado School of Mines, United States of America), Reinhard Mechler (IIASA, Austria), Aditi Mukherji (International Livestock Research Institute, Kenya), Marta Olazabal (Basque Centre for Climate Change, Spain), Yang Ou (Peking University, China), Shonali Pachauri (IIASA, Austria), Duncan Pickard (Debevoise & Plimpton LLP, United States of America), Anna Pirani (Euro-Mediterranean Center on Climate Change [CMCC Foundation], Italy), Elvira Poloczanska (Plymouth Marine Laboratory, United Kingdom), Debra C. Roberts (University of KwaZulu-Natal, South Africa and University of Twente, Kingdom of the Netherlands), Joeri Rogelj (Imperial College London, United Kingdom), Rupert Stuart-Smith (University of Oxford, United Kingdom), Piotr Walski (UCT) Zinta Zommers (UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs, Latvia)

Box 1: Overshoot terminology: Joeri Rogelj (Imperial College London, United Kingdom), Andy Reisinger (Australian National University, Australia), Anna Pirani (Euro-Mediterranean Center on Climate Change [CMCC Foundation], Italy), Carl-Friedrich Schleussner (International Institute for Applied Systems Analysis [IIASA], Austria)

Chapter 1

Lead Authors: Joeri Rogelj (Imperial College London, United Kingdom), Carl-Friedrich Schleussner (IIASA, Austria)

Contributing Authors: Melania Guerra (Climate Analytics, Germany), Yang Ou (Peking University, China)

Coordination liaison: Bruce Hewitson (UCT, South Africa)

Chapter 2

Lead Authors: Zelina Zaiton Ibrahim (Universiti Putra Malaysia, Malaysia), Adrienne Marshall (Colorado School of Mines, United States of America), Reinhard Mechler (IIASA, Austria)

Contributing Authors: Li-Jing Liu (Beijing Institute of

Technology, China), Andrew Hartley (Met Office, United Kingdom), Zinta Zommers (UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs, Latvia), Andrew Kruczkiewicz (Columbia University, United States of America)

Coordination liaison: David Dodman (IHS, Erasmus University Rotterdam, Kingdom of the Netherlands)

In Focus: Sea-level rise and the small island developing states adaptation challenge Shobha Maharaj (University of Fiji, Fiji)

Box 2: Debt, insurance and fiscal capacity: Elisabeth Gilmore (Carleton University, Canada), Sergio Margulis (International Institute for Sustainability, Rio de Janeiro, Brazil)

In Focus: Economic impacts and distributional risks under overshoot: Tatiane Moura do Nascimento (Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Brazil), Sergio Margulis (International Institute for Sustainability, Rio de Janeiro, Brazil)

Chapter 3

Lead Authors: Andy Reisinger (Australian National University, Australia), Joana Portugal-Pereira (University of Lisbon, Portugal; and Federal University of Rio de Janeiro, Brazil), Anna Pirani (CMCC Foundation, Italy)

Contributing Authors: Minal Pathak (Ahmedabad University, India), Gaurav Ganti (IIASA, Austria), Shonali Pachauri (IIASA, Austria)

Coordination liaison: Richard A. Betts (University of Exeter and Met Office, United Kingdom)

Chapter 4

Lead Authors: Shobha Maharaj (University of Fiji, Fiji), Kristie L. Ebi (University of Washington, United States of America), Coleen Vogel (University of the Witwatersrand, South Africa)

Contributing Authors: Marina Andrijevic (IIASA, Austria), Rupert Stuart-Smith (University of Oxford, United Kingdom), Richard J. Dawson (Newcastle University, United Kingdom), Mariam Saleh Khan (Weather and Climate Services, Pakistan and Climate Analytics, Germany), Aditi Mukherji (International Livestock Research Institute, Kenya), Elisabeth Gilmore (Carleton University, Canada), Marta Olazabal (Basque Centre for Climate Change, Spain), Elvira Poloczanska (Plymouth Marine Laboratory, United Kingdom), Paula A. Harrison (UKCEH, United Kingdom), Anita Lazurko (UKCEH, United Kingdom), Salma Sabour (University of Southampton, United Kingdom)

Coordination liaison: Debra C. Roberts (University of KwaZulu-Natal, South Africa and University of Twente, Kingdom of the Netherlands)

In Focus: Legal implications of 1.5°C overshoot pathways: Duncan Pickard (Debevoise & Plimpton LLP, United States of America), Angela Kariuki (UNEP), Rupert Stuart-Smith (University of Oxford, United Kingdom), Andy Reisinger (Australian National University, Australia)

In Focus: Governance, legitimacy and equity: Elisabeth Gilmore (Carleton University, Canada), Shobha Maharaj (University of Fiji, Fiji)

Conclusion

Mirey Atallah, Sharon Gil, Lena Kopetzky, Nicolien de Lange (UNEP)

In Focus: Species redistribution and the unmaking of protection: Shobha Maharaj (University of Fiji, Fiji)

Scientific Advisory Board

Mirey Atallah (UNEP), Richard A. Betts (University of Exeter and Met Office), David Dodman (IHS, Erasmus University Rotterdam), Kristie L. Ebi (University of Washington), Bruce Hewitson (UCT), Zelina Zaiton Ibrahim (Universiti Putra Malaysia), Chris D. Jones (Met Office Hadley Centre and University of Bristol), Shobha Maharaj (University of Fiji), Adrienne Marshall (Colorado School of Mines), Amanda Maycock (University of Leeds), Timon McPhearson (New York University / Urban Systems Lab), Reinhard Mechler (IIASA), Wendy Parker (Virginia Tech), Anna Pirani (CMCC Foundation), Joana Portugal-Pereira (University of Lisbon and Federal

University of Rio de Janeiro), Andy Reisinger (Australian National University), Aromar Revi (Indian Institute for Human Settlements), Debra C. Roberts (University of KwaZulu-Natal / University of Twente), Joeri Rogelj (Imperial College London), Carl-Friedrich Schleussner (IIASA), Karina von Schuckmann (Mercator Ocean International), Christopher Trisos (UCT), Coleen Vogel (University of the Witwatersrand), Piotr Walski (UCT)

Reviewers

Mozaharul Alam (UNEP), Nathan Borgford-Parnell (UNEP), Claire Bulger (European Climate Foundation), Inês Breda (Finding Water), Maria Caballero Espejo (UNEP), Keti Chachibaia (adaptation practitioner), Alvin Chandra (Asian Development Bank), John Christensen† (CONCITO), Ignacio Sanchez Diaz (UNEP), Laurent Drouet (CMCC Foundation), Nicolas Galudec (UNEP), Julius Garbe (International Cryosphere Climate Initiative [ICCI]), Oliver Geden (German Institute for International and Security Affairs [SWP]), Yannick Glemarec (CIRED, France), Susana Hancock (ICCI), Bill Hare (Climate Analytics GmbH) Andrea Hinwood (UNEP), Ceecee Holz (Climate Equity Reference Project Canada), Jason Jabbour (UNEP), Ørjan N. Karlsson (Independent Author), Angela Kariuki (UNEP), Sumalee Khosla (UNEP), James Kirkham (ICCI), Robert Kopp (Rutgers University), Martin Krause (UNEP), Thelma Krug (Institute for Climate and Society), Gabriel Labbate (UNEP), Debora Ley (Ministry of Environment and Natural Resources, Guatemala), Augustin Maria (World Bank), Anne Olhoff (UNEP), Marina Olshanskaya (Central European University), Lorena Pasquini (UCT), Pam Pearson (ICCI), Vincent Roy (Natural Resources Canada), Stefan Schwietzke (UNEP), Elizabeth Sellwood (UNEP), Himanshu Sharma (UNEP), Ho-Ming So Denduangrudee (The Samdhana Institute), Darren Swanson (Novel Futures Corporation), Jessica Troni (UNEP), Penny Urquhart (Independent climate resilient development specialist), Rachel Warren (University of East Anglia), Theresa Wong (IPCC WGII Technical Support Unit), Ruth Zugman do Coutto (UNEP)

Media and launch support

UNEP Communication Division

Editing, design and layout

Copy edit: Amanda Lawrence-Brown (UNEP)

Abel Alayew (UNEP), Kerry Gilhar (UNEP) (design and layout) and Beverley McDonald (UNEP) (cover design)

Co-design process and development of the signature visualisation, Figure 5.1. Temperature overshoot: actions and challenges: InfoDesignLab (Angela Morelli and Tom Gabriel Johansen)

Thanks also to

Sofia Arocha (UNEP), Neville Ash (UNEP World Conservation Monitoring Centre [UNEP-WCMC], Mario Boccucci (UNEP), Tomas Bredariol (UNEP), Ingrid Coetzee (Local Governments for Sustainability [ICLEI]), Youssef Hanna (UNEP), Wei Huang (UNEP), Youngran Hur (UNEP), Anjela Ilagan (Philippine Atmospheric, Geophysical and Astronomical Services Administration), Johannes Kieft (UNEP), Hong Peng Lei (UNEP), Sophie Loran (UNEP), Felipe Maia Ehmke (City of Curitiba), Augustin Maria (World Bank), Patrick McVeigh (UNEP), Sharone Molly (UNEP), Chiara Morfeo (C40 Cities [C40]), Estefania Ayelen Rodriguez Del Puerto (UNEP), Sajni (Niki) Shah (UNEP)

The research underpinning the report has received partial support by United Kingdom aid from the United Kingdom Government as part of the Climate Adaptation and Resilience (CLARE) research programme, and the views expressed herein do not necessarily represent those of the United Kingdom Government.

† UNEP wishes to honor the memory of John Christensen, who passed away before the completion of this work.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 6

Abbreviations and Acronyms

AMOC	Atlantic Meridional Overturning Circulation
AR6	Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
BECCS	Bioenergy with carbon capture and storage
C3S	Copernicus Climate Change Service
CBD	Convention on Biological Diversity
CBDR-RC	Common but differentiated responsibilities and respective capabilities
CCAC	Climate and Clean Air Coalition
CDR	Carbon dioxide removal
CH_4	Methane
CO_2	Carbon dioxide
CO_2-eq	Carbon dioxide equivalent
COP 28	the twenty-eighth session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change
COP 27	the twenty-seventh session of the Conference of the Parties (COP 27) to the United Nations Framework Convention on Climate Change
COVID-19	Coronavirus disease 2019
DACCS	Direct air carbon capture and storage
EbA	Ecosystem-based Adaptation
EEA	**European Environment Agency**
ESM	Earth System Models
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GCA	Global Center on Adaptation
GDP	Gross Domestic Product
GHGs	Greenhouse gases
GMSL	Global Mean Sea Level
GMST	Global Mean Surface Temperature
$GtCO_2$	billion tons of carbon dioxide
GWP	Global Warming Potential
IAM	Integrated Assessment Model
ICJ	International Court of Justice
ICRI	International Coral Reef Initiative
ICT	Information and Communication Technology
IEA	International Energy Agency
IMF	International Monetary Fund
IPBES	Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ITCZ	Intertropical Convergence Zone
ITLOS	International Tribunal for the Law of the Sea
LDC	Least Developed Country
LULUCF	Land Use, Land-Use Change and Forestry
NAPs	National Adaptation Plans
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCP	Nature's Contributions to People
NDCs	Nationally Determined Contributions
NGOs	Non-Governmental Organizations
NOAA	United States National Oceanic and Atmospheric Administration
NOx	Nitrogen Oxide
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OED	Oxford English Dictionary
PAs	Protected Areas
PADDD	Protected area downgrading, downsizing and degazettement
SDGs	Sustainable Development Goals
SEI	Stockholm Environment Institute
SIDS	Small Island Developing States
SLR	Sea-level rise
SO_2	Sulphur Dioxide
SSP	Shared Socioeconomic Pathway

TCRE	Transient Climate Response to Cumulative Emissions of CO_2
TWh	terawatt-hours
UN	United Nations
UN DESA	United Nations Department of Economic and Social Affairs
UNGA	United Nations General Assembly
UN Women	United Nations Women
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development
UNCLOS	United Nations Convention on the Law of the Sea
UNDP	United Nations Development Programme
UNDRR	United Nations Office for Disaster Risk Reduction
UNEP	United Nations Environment Programme
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
UNICEF	United Nations Children's Fund
WAF	World Agriculture Forum
WGI	Working Group I
WHO	World Health Organization
WMO	World Meteorological Organization
WWA	World Weather Attribution

Glossary

In this glossary, selected key terms used in this report are defined. The terms in this glossary are taken from the online glossary of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) https://apps.ipcc.ch/glossary/ unless otherwise indicated.

Adaptation: In human systems, the process of adjustment to actual or expected climate and its effects, in order to moderate harm or exploit beneficial opportunities. In natural systems, the process of adjustment to actual climate and its effects; human intervention may facilitate adjustment to expected climate and its effects.

Adaptation limits: The point at which an actor's objectives (or system needs) cannot be secured from intolerable risks through adaptive actions.

Hard adaptation limit: No adaptive actions are possible to avoid intolerable risks.

Soft adaptation limit: Options may exist but are currently not available to avoid intolerable risks through adaptive action.

Transformational adaptation: Adaptation that changes the fundamental attributes of a socio-ecological system in anticipation of climate change and its impacts (Möller *et al.* 2022) — a fundamental, system-wide reorganization that reaches beyond technology and economic structures to paradigms, goals and values (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [IPBES] 2024b), and that addresses the underlying drivers of climate risk in inclusive ways, enhances the capacity to cope with and recover from future impacts, and guards against maladaptive outcomes now and in the future (Biesbroek *et al.* 2026).

Afforestation: Conversion to forest of land that historically has not contained forests.

Bioenergy: Energy derived from any form of biomass or its metabolic by-products.

Bioenergy with carbon dioxide capture and storage (BECCS): Carbon dioxide capture and storage (CCS) technology applied to a bioenergy facility. Note that, depending on the total emissions of the BECCS supply chain, carbon dioxide (CO_2) can be removed from the atmosphere.

Carbon budget: The maximum amount of cumulative net global anthropogenic CO_2 emissions that would result in limiting global warming to a given level with a given probability, considering the effect of other anthropogenic climate forcers. This is referred to as the Total Carbon Budget when expressed starting from the pre-industrial period, and as the Remaining Carbon Budget when expressed from a recent specified date.

Carbon dioxide removal (CDR): Anthropogenic activities removing CO_2 from the atmosphere and durably storing it in geological, terrestrial or ocean reservoirs, or in products. It includes existing and potential anthropogenic enhancement of biological or geochemical CO_2 sinks and direct air carbon dioxide capture and storage (DACCS) but excludes natural CO_2 uptake not directly caused by human activities.

Cascading impacts: Cascading impacts from extreme weather/climate events occur when an extreme hazard generates a sequence of secondary events in natural and human systems that result in physical, natural, social or economic disruption, whereby the resulting impact is significantly larger than the initial impact. Cascading

impacts are complex and multi-dimensional, and are associated more with the magnitude of vulnerability than with that of the hazard.

Earth system: The Earth system is a complex social-environmental system of interacting physical, chemical, biological and social components and processes that determine the state and evolution of the planet and life on it; The Earth´s interacting physical, chemical and biological processes. The system consists of the land, oceans, atmosphere and poles. It includes the planet's natural cycles—the carbon, water, nitrogen, phosphorus, sulphur and other cycles—and deep Earth processes (UNEP 2025f)

Earth System Model (ESM): A coupled atmosphere–ocean general circulation model (AOGCM) in which a representation of the carbon cycle is included, allowing for interactive calculation of atmospheric carbon dioxide (CO_2) or compatible emissions. Additional components (e.g. atmospheric chemistry, ice sheets, dynamic vegetation, nitrogen cycle, but also urban or crop models) may be included.

Hysteresis: The dependence of the state of a system on its history (so-called path-dependency). In the Earth system, hysteresis behaviour is often caused by system time lags (e.g. due to inertia) and non-linear processes. Jeltsch-Thömmes *et al.* (2020)

Impacts: The consequences of realised risks on natural and human systems, where risks result from the interactions of climate-related hazards (including extreme weather/climate events), exposure and vulnerability. Impacts generally refer to effects on lives, livelihoods, health and well-being, ecosystems and species, economic, social and cultural assets, services (including ecosystem services) and infrastructure. Impacts may be referred to as consequences or outcomes and can be adverse or beneficial. (IPCC AR6, WGI definition)

Specifically in this report, the impact can be at different timescales: current impacts, impacts under exceedance, peaking, reversal or stabilization; and broader, projected impacts under overshoot and the mitigation and adaptation responses required. (expanded from IPCC by the authors of this report)

Irreversibility: A perturbed state of a dynamical system is defined as irreversible on a given time scale if the recovery from this state due to natural processes takes substantially longer than the time scale of interest.

Loss and Damage, and losses and damages: Research has taken Loss and Damage (capitalised letters) to refer to political debate under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) following the establishment of the Warsaw Mechanism on Loss and Damage in 2013, which is to 'address loss and damage associated with impacts of climate change, including extreme events and slow onset events, in developing countries that are particularly vulnerable to the adverse effects of climate change.' Lowercase letters (losses and damages) have been taken to refer broadly to harm from (observed) impacts and (projected) risks and can be economic or non-economic.

Maladaptation: Actions that may lead to increased risk of adverse climate-related outcomes, including via increased greenhouse gas (GHG) emissions, increased or shifted vulnerability to climate change, more inequitable outcomes, or diminished welfare, now or in the future. Most often, maladaptation is an unintended consequence.

Mitigation (of climate change): A human intervention to reduce emissions or enhance the sinks of greenhouse gases.

Mitigation potential: The quantity of net GHG emission reductions that can be achieved by a given mitigation option relative to specified emission baselines. [Note: Net GHG reductions are the sum of reduced emissions and/or enhanced sinks]

Net-zero CO_2 emissions: Condition in which anthropogenic carbon dioxide (CO_2) emissions are balanced by anthropogenic CO_2 removals over a specified period.

Net-zero GHG emissions: Condition in which metric-weighted anthropogenic GHG emissions are balanced

by metric-weighted anthropogenic GHG removals over a specified period. The quantification of net-zero GHG emissions depends on the GHG emission metric chosen to compare emissions and removals of different gases, as well as the time horizon chosen for that metric.

Net-negative CO_2 emissions: Condition in which anthropogenic CO_2 removals exceed anthropogenic CO_2 emissions over a specified period. (IPCC AR6)

Net-negative GHG emissions: A situation of net negative GHG emissions is achieved when metric-weighted anthropogenic GHG removals exceed metric-weighted anthropogenic GHG emissions. Where multiple GHG are involved, the quantification of net emissions depends on the metric chosen to compare emissions of different gases (such as the global warming potential), as well as the chosen time horizon. (adapted from IPCC AR6 by the authors of this report)

Pathways: The temporal evolution of natural and/or human systems towards a future state. Pathway concepts range from sets of quantitative and qualitative scenarios or narratives of potential futures to solution-oriented decision-making processes to achieve desirable societal goals. Pathway approaches typically focus on biophysical, techno-economic and/or socio-behavioural trajectories and involve various dynamics, goals and actors across different scales.

Emissions pathways: Modelled trajectories of global anthropogenic emissions over the 21st century.

Overshoot, peak and decline pathways, sometimes abbreviated as **Overshoot pathways**. Pathways that first exceed a global warming level (e.g. 1.5°C) and then return to or below that level again before the end of a specified period (e.g. before 2100). Sometimes the magnitude and likelihood of the overshoot are also characterized. The overshoot duration can vary but typically lasts for at least multiple decades. (adapted from IPCC AR6 by the authors of this report)

A 1.5°C overshoot, peak and decline pathway comprises a multidecadal sequence involving four distinct stages:

- **Exceedance of 1.5°C:** the period in which global warming surpasses 1.5°C but before it reaches its peak.
- **Plateauing stage:** the period when global warming reaches and plateaus at its maximum level above 1.5°C for a period before starting to decline. The maximum level is called **peak warming**.
- **Decline stage:** the period in which global temperatures begin to decline from their peak level.
- **Stabilization stage:** reached once global temperatures return to or below 1.5°C after peak and reversal, and stabilize at this level.

For the purpose of this report, **Overshoot,** when mentioned alone refers to exceedance of a specified global warming level. The world is considered in overshoot when the multidecadal average global surface air temperature increase exceeds a specified warming level (e.g. 1.5°C), not when the global temperature in a single year exceeds that warming level temperature. (Further explained in Chapter 1, following the introduction) (Rogelj *et al.* 2026)

Reasons for concern (RFCs): Elements of a classification framework, first developed in the IPCC Third Assessment Report, which aims to facilitate judgements about what level of climate change may be dangerous (in the language of Article 2 of the UNFCCC; IPCC 2023a) by aggregating risks from various sectors, considering hazards, exposures, vulnerabilities, capacities to adapt and the resulting impacts.

Climate resilient development: a process of implementing GHG mitigation and adaptation options to support sustainable development for all. (adapted from IPCC AR6 by the authors of this report)

Risk: The potential for adverse consequences for human or ecological systems, recognizing the diversity of values and objectives associated with such systems. In the context of climate change, risks can arise from potential impacts of climate change as well as human responses to climate change. Relevant adverse consequences include those on lives, livelihoods, health and well-being, economic, social and cultural assets and investments, infrastructure, services (including ecosystem services), ecosystems and species. In the context of climate

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 11

change impacts, risks result from dynamic interactions between climate-related hazards with the exposure and vulnerability of the affected human or ecological system to the hazards. Hazards, exposure and vulnerability may each be subject to uncertainty in terms of magnitude and likelihood of occurrence, and each may change over time and space due to socio-economic changes and human decision-making. In the context of climate change responses, risks result from the potential for such responses not achieving the intended objective(s), or from potential trade-offs with, or negative side-effects on, other societal objectives, such as the Sustainable Development Goals (SDGs). Risks can arise for example from uncertainty in the implementation, effectiveness or outcomes of climate policy, climate-related investments, technology development or adoption, and system transitions.

Tipping element: A component of the Earth system that is susceptible to a *tipping point*.

Tipping point: A critical threshold beyond which a system reorganizes, often abruptly and/or irreversibly.

Transition: The process of changing from one state or condition to another in a given period. Transition can be in individuals, firms, cities, regions and nations, and can be based on incremental or transformative change.

Just transitions: A set of principles, processes and practices that aim to ensure that no people, workers, places, sectors, countries or regions are left behind in the transition from a high-carbon to a low-carbon economy. It stresses the need for targeted and proactive measures from governments, agencies and authorities to ensure that any negative social, environmental or economic impacts of economy-wide transitions are minimized, while benefits are maximised for those disproportionally affected. Key principles of just transitions include: respect and dignity for vulnerable groups; fairness in energy access and use, social dialogue and democratic consultation with relevant stakeholders; the creation of decent jobs; social protection; and rights at work. Just transitions could include fairness in energy, land use and climate planning and decision-making processes; economic diversification based on low-carbon investments; realistic training/retraining programmes that lead to decent work; gender-specific policies that promote equitable outcomes; the fostering of international cooperation and coordinated multilateral actions; and the eradication of poverty. Lastly, just transitions may embody the redressing of past harms and perceived injustices.

Vulnerability: The propensity or predisposition to be adversely affected. Vulnerability encompasses a variety of concepts and elements including sensitivity or susceptibility to harm and lack of capacity to cope and adapt.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 12

Table of contents

Foreword 1

Executive summary 2

Introduction 8

Why this report? 8
Understanding overshoot pathways 9
Every fraction of a degree matters, every investment matters 10

01 **Entering an era of 1.5°C overshoot** 13

1.1 Global warming approaching 1.5°C 13
1.2 Futures lost and futures still available 15
1.3 The climate impacts of entering a 1.5°C world 18
1.4 Global warming reversal after overshoot 19
1.6 Adaptation and mitigation must move together in tackling overshoot 25

02 **Overshoot risks and impacts: Implications on human and environmental systems** 29

2.1 Framing risk, impacts and implications 29
2.2 Nature, ecosystems and biodiversity 32
2.3 Impacts on social and human systems 38

03 **Limiting overshoot - mitigation pathways** 48

3.1 Accelerating mitigation to limit climate related risks 48
3.2 Stringent near-term mitigation to limit peak warming 49
3.3 Strategies to bring global warming back below 1.5°C 52
3.4 Feasibility, equity and avoiding over-reliance on a future temperature decline 57

04 **Adapting to overshoot realities in the context of development** 65

4.1 Adaptation in an overshoot context 66
4.2 Contexts matter: The difficulty in aligning adaptation to lived realities, both now and in the future 67
4.3 Implementation of mitigation and adaptation pathways: Interdependencies and trade-offs 69
4.4 Systemic and transformational adaptation: What considerations are needed for overshoot risk reduction 81
4.5 Synthesis and key take aways for adaptation 83

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 13

05 **Conclusion: Through overshoot and beyond - Risks, choices and frontiers** **89**

5.1 Reading of overshoot pathways 89
5.2 Decisions under constraint and uncertainty 92
5.3 Frontiers opened by overshoot 93
5.4 Navigating the return to a safer future 96

06 **Bibliography** **97**

List of figures

ES 1: Temperature overshoot: actions and challenges

1.1: Key pathway concepts

1.2: Futures available and futures lost

1.3: Key determinants of overshoot, peak, and decline pathway outcomes down the impact chain

1.4: Reversible, partially reversible, and irreversible dynamics of Earth system components under global warming decline

1.5: Crossing 1.5°C means adaptation and mitigation must move together as they represent mutually supporting pillars of resilient future societies

2.1: Risk propeller highlighting how risk, as determined by hazard, vulnerability and exposure, could evolve throughout an overshoot, peak and decline pathway

2.2: Potential impacts during exceedance, peak, decline and stabilization stages will be path-dependent, likely with higher impacts for a given GMST level in the decline stage than in the exceedance stage

3.1: Overview of annual mitigation potentials by 2035 by sector

3.2: Examples of residual GHG emissions and CO_2 removals at the time global net-zero CO_2 emissions are reached in modelled mitigation pathways assessed in the IPCC AR6 that limit global warming likely to 2°C and below

3.3: Pathways returning warming to 1.5°C after overshoot, compared with stabilization at 1.7–1.8°C. Overshoot, peak and decline pathways achieve this through deeper CO_2 cuts, enhanced methane reductions or increased CDR

4.1: Conceptual trajectories of the four key drivers of climate-related risk—hazards, exposure, vulnerability and risks from mitigation responses—along an overshoot, peak and decline pathway

4.2: Transformational ways of entangled organizing, seeing and doing (all requiring appropriate actions)

5.1: Temperature overshoot: actions and challenges

List of tables

3.1: Feasibility of mitigation strategies across stages of overshoot, peak and decline pathways, considering intergenerational and interregional equity

4.1: Summary of the risks, overarching adaptation philosophy and key adaptation principles for infrastructure and the built environment for stages of overshoot of 1.5°C

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 14

Foreword

Even though global warming is set to cross 1.5°C above pre-industrial levels, likely within the next few years, the goal remains limiting warming to this level. However, the goal must now be approached from above while the world adapts to intensifying climate impacts. Every fraction of a degree avoided and every year by which overshoot is shortened will save lives, protect ecosystems and reduce economic losses.

As the UNEP Limiting Overshoot report shows, there are no good outcomes above 1.5°C. Extreme weather, glacier melt, ecosystem loss and sea-level rise will intensify. Some Small Island Developing States and low-lying coastal cities could be partially or completely submerged. Risks of tipping points will grow. Human health, food and water security, cities and infrastructure will come under increasing strain. These impacts will not be distributed equally, and some losses will be irreversible even if global temperatures eventually decline.

So, we must hold fast to global commitments under the Paris Agreement, try to return to below 1.5°C by the end of the century and adapt to the impacts of climate change. Prepared with the contribution of leading experts from across climate science, adaptation, mitigation, governance and sustainable development, Limiting Overshoot examines how we might achieve this.

We must deliver rapid and deep cuts to CO_2, methane and other greenhouse gases immediately, working towards net-zero – with governments sending the right policy signals to financial institutions and the private sector. As net-zero is merely a milestone, we must follow a long-term path to net-negative emissions – while delivering transformational adaptation and resilience. As mitigation and adaptation are interconnected, measures should target both for the greatest impact. Carbon Dioxide Removal (CDR) – the process of removing carbon from the air and storing it through reforestation or other means – will be needed to bring temperatures back down, so we should research these approaches – while being aware of the risks, trade-offs, limits and need for strong governance.

To succeed, we need stronger political will and multilateralism, and more agile and inclusive governance, with equity and justice at the core of all action. Countries with greater historical responsibility for climate change should act the fastest and with the greatest ambition. And, as many nations and communities will likely face permanent changes, we will require a fundamental rethink to long-term governance to ensure that those who have contributed least to global warming are not left to bear its greatest burdens.

Efforts will need to evolve over the years to address many unknowns, but decisions taken now and in the next few years will determine whether viable options remain to reverse warming towards 1.5°C. So, I call on governments—and on everyone with the power to effect change—to act with urgency and determination. This is not the future we sought. A return to 1.5°C is not assured. But limiting the magnitude, duration and consequences of overshoot, while preserving the possibility of bringing temperatures back down, is the best remaining option to protect vulnerable people, reduce losses and secure a livable future for all.



Inger Andersen,
UNEP Executive Director

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 15

Executive summary

1. While the international community has made progress on climate change, global action to cut greenhouse gas emissions has not been fast enough to avoid global warming crossing 1.5°C above pre-industrial levels in the next few years.

This means surpassing the multi-decadal global warming level of 1.5°C, the central long-term temperature goal of the Paris Agreement, as affirmed by the International Court of Justice and backed by a UN General Assembly resolution. Even an optimistic scenario of current government pledges (full implementation of all national climate plans plus meeting additional net-zero targets) puts expected peak temperature rise at 1.8°C.

2. Exceedance of 1.5°C should not be interpreted as safe or acceptable; there are no benign scenarios with global temperature rise above this level.

Risks and impacts include faster sea-level rise, a higher likelihood of collapse of ecosystems such as coral reefs, more extreme heat and wildfires, and profound changes to the cryosphere (ice sheets, sea ice, glaciers, permafrost and snow). For example, glaciers could lose more than a quarter of their mass by 2100, which could raise sea levels by 9 to 12.5` cm (for warming up to/less than +3°C) and permanently alter water availability in many places. There is also a higher risk of irreversible tipping points to global systems such as the West Antarctic and Greenland ice sheets, the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) and the Amazon rainforest — which would reshape the world forever.

While there are uncertainties around the timings and strength of these impacts and tipping points, it is clear they will harm people, societies and economies, particularly in Small Island Developing States (SIDS) and low-lying cities, some of which face partial or complete submersion. Food security and water supplies will be hit — for example, projections indicate declines of up to 14 per cent in global food production by 2050 in the absence of effective adaptation. More frequent and intense heatwaves, more nutrition-related diseases and greater risks of pathogen spillover will increase illnesses and deaths.

Cities and infrastructure will be at greater risk from stronger and longer heatwaves and flooding. Warming oceans, declining oxygen levels and rising acidity will make it harder for marine life and the communities that depend on it to survive. Higher energy demand, consumer costs, and insurance and financial system stress will pose risks to all nations.

3. The global goal remains limiting long-term average warming to 1.5°C.

However, overshoot means this goal must now be approached from above, while simultaneously adapting to the impacts of climate change. This means meeting and exceeding, not rescinding, existing commitments and concurrently delivering faster mitigation and adaptation.

With unprecedented action it is possible to minimize and adapt to the impacts of exceedance and return to 1.5°C — which would keep options open to protect the poor and vulnerable, minimize harm to infrastructure and livelihoods, and support people and nature. To do so, the world must get onto an 'overshoot, peak and decline' pathway that holds temperature rise to the lowest level possible, then brings it down by the end of the century, all while taking adaptation actions that reduce vulnerability to the current or expected impacts of climate change.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 16

This is by no means an acceptable or preferred pathway; it is simply the best remaining option.

4. Avoiding every additional fraction of a degree of global warming and reducing the time in overshoot decrease risks and damages and increase the chances of bringing temperatures back down.

The duration and severity of the overshoot, peak and decline pathway, and the ability of communities to cope, will depend on how fast emissions are cut and how quickly transformational adaptation measures are implemented. Reductions in methane and other short-lived climate pollutants are particularly important in the immediate term. Enhancing adaptive and mitigation capacity requires strong political will, urgent multilateral action, effective policies and finance — with equity, justice and differentiated responsibilities serving as guiding principles.

5. The global response needs to encompass three interconnected phases: immediate response, coping and containment, and long-term resilience.

- **Immediate response phase (as temperatures approach, then exceed, 1.5°C)**: Slow warming quickly through deep emissions cuts, including to methane and other short-lived climate pollutants. Adopt urgent adaptation measures that protect the most-vulnerable people and ecosystems.
- **Coping and containment phase (as temperatures peak)**: Advance deep and sustained decarbonization that achieves at least net-zero emissions. Develop societal resilience, while managing severe impacts and risks.
- **Long-term resilience phase (as temperatures decline and stabilize)**: Deliver sustained net-negative carbon dioxide (CO_2) emissions. Enhance sustainability and resilience. Ensure lasting adaptation where irreversible limits have been reached.

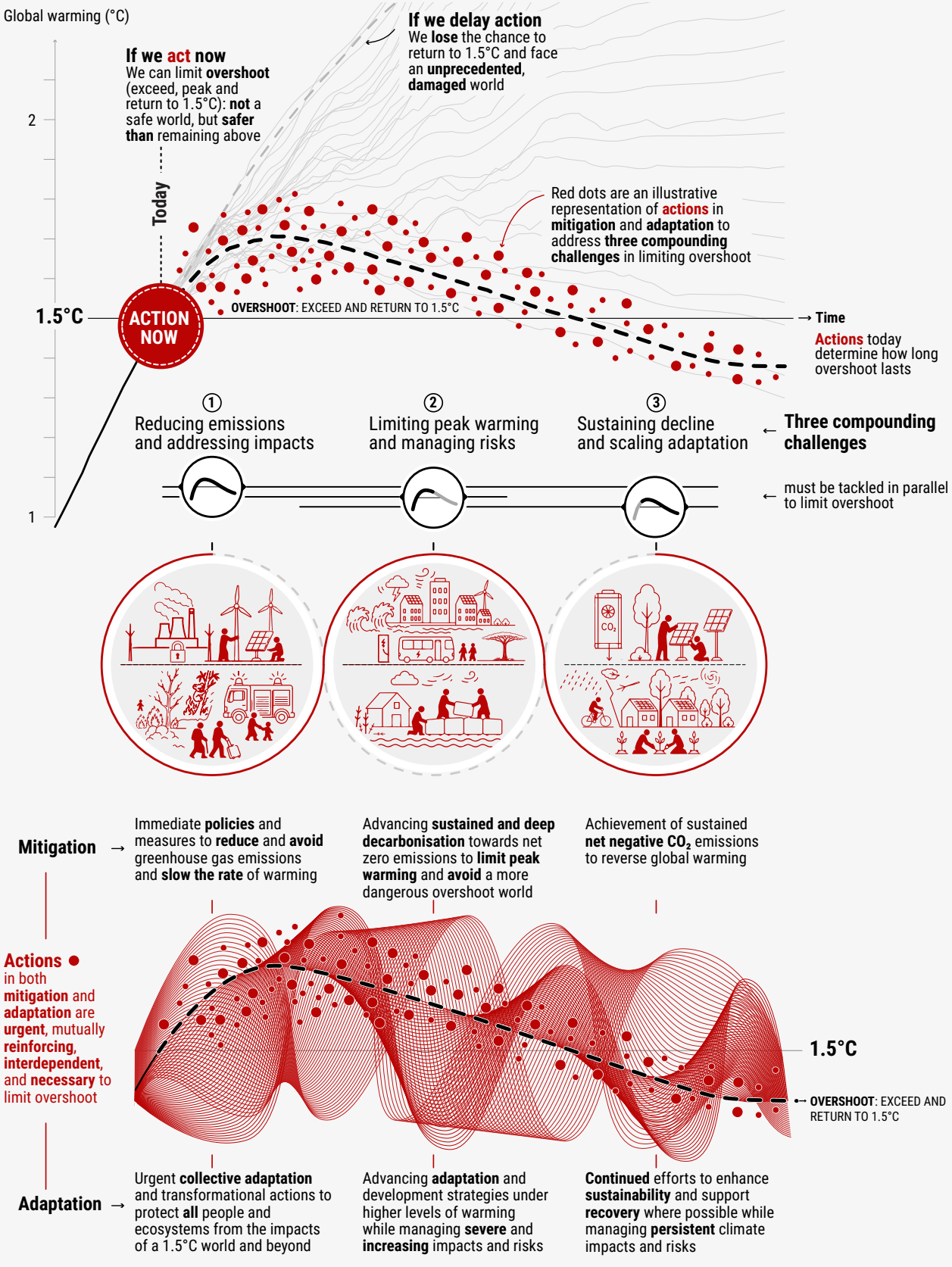
Figure ES 1: Temperature overshoot: actions and challenges *(See next page)*

Description: This is an illustrative depiction of temperature overshoot and the actions and challenges associated with limiting its magnitude, duration and consequences. The visual features in the **top panel** are indicative and do not represent precise warming magnitudes, rates or probabilities. The black dashed line represents an overshoot pathway adapted from an SSP2-4.5 pathway based on IPCC (2021), while the light grey dashed line represents a high-overshoot pathway adapted from Reisinger *et al.* (2025). The horizontal line marks the 1.5°C global warming level, relative to 1850–1900. The light grey trajectories in the background are illustrative and are informed by visual interpolation across an ensemble of SSP scenarios and tipping-point peaks, depicting a world that may become increasingly challenging depending on the actions we take. The red dots are an illustrative representation of actions in mitigation and adaptation to limit overshoot. (See Conclusion for full description)

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 17

TEMPERATURE OVERSHOOT: EXCEED AND RETURN TO 1.5°C

Decades of **insufficient** action have locked us into **three compounding challenges** to limiting **temperature overshoot**, with an **urgent** need for **action** now



© Infodesignlab

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 18

In practice, multiple phases will coexist across time and across and within regions. Impacts are expected to accumulate dynamically across the overshoot, peak and decline pathway, with each phase inheriting the legacies of those that preceded it.

6. Mitigation and adaptation are fundamentally interconnected and must advance together throughout all phases.

Mitigation and adaptation are both critical to address the climate challenge and protect human and natural systems. Many interventions can achieve adaptation and mitigation goals at once — increasing urban tree canopy coverage, for example, lowers heat-related morbidity and mortality while reducing the need for energy intensive and polluting cooling approaches.

Weak mitigation will increase impacts and potentially divert funds to emergency responses instead of needed climate action, creating a feedback loop. Yet even the most successful mitigation efforts will not eliminate the need for adaptation: 1.5°C is not considered safe for most nations, communities, ecosystems and sectors. Meanwhile, current adaptation plans and their implementation often overlook links to mitigation, neglect inequalities and insufficiently address loss and damage and adaptation limits. Without proper adaptation, the assets built to cut emissions are themselves at risk. Therefore, actions to reduce and manage the risks of climate change will need to be radically re-thought, re-imagined and re-calibrated under the overshoot, peak and decline pathway.

7. To navigate an overshoot, peak and decline pathway, the world must adopt proactive approaches that deploy flexible, multi-level governance, particularly when it comes to adaptation.

Such approaches are necessary to anticipate coming risks, integrate new knowledge, reduce and adapt to climate impacts before they arrive with full force, and allow enough agility to adjust to uncertainties associated with the decline to 1.5°C. Adaptation set up now forms the foundation for all efforts to come, but it must become transformational and responsive to evolving non-linear and abruptly arising risks, recognizing these will occur unevenly across regions or systems. Expected profound shifts—such as submersion of SIDS or low-lying coastal cities and uninhabitability across the world—mean that incremental adjustments are not enough.

Transformational adaptation must embed flexibility, learning and continual revision of baselines across all phases.

8. Conventional and novel Carbon Dioxide Removal (CDR) will be needed in addition to, not instead of, sustained reductions in residual greenhouse gas emissions, but CDR methods come with risks and trade-offs that could limit their potential — calling for strong governance frameworks that ensure responsible and appropriate deployment of CDR.

CDR comes in two forms: conventional, such as afforestation and ecosystem restoration, and novel, such as bioenergy combined with carbon capture and storage, and direct air carbon capture and storage. However, CDR can only contribute credibly to a return to below 1.5°C within the 21st century if peak warming remains well below 2°C and all remaining emissions of CO_2, methane and other greenhouse gases are reduced. Beyond around 1.8°C, decline to 1.5°C during the 21st century becomes increasingly challenging. In a warmer future, nature's removal and carbon retention capacity will likely be eroded, while competition between sustainable development goals and CDR can limit the feasibility of land-intensive mitigation strategies.

It would take over 100 years of afforestation and forest management at the current scale, and zero residual CO_2 emissions, to bring warming back by 0.1°C. Meanwhile, the temperature reduction achievable through novel CDR that relies on geological carbon storage is also constrained. Just maintaining net-zero CO_2 emissions could exhaust current estimated storage capacity in sedimentary basins by 2200.

While rapid upscaling of CDR is critical, alongside urgent and accelerated emission reductions, strong governance frameworks on CDR are needed to manage implications for equity, scale and uptake — and to provide guardrails for the exploration of new and uncertain technologies that could have unintended negative consequences.

Overall, even optimistic CDR scaling is unlikely to deliver a temperature reversal beyond a few tenths of a degree this century. This emphasizes the importance of focusing on reducing greenhouse gas emissions now.

9. Equity and justice must be the core of effective strategies to protect the vulnerable, create a just transition for communities and workforces, and secure a liveable future for coming generations.

Countries with greater historical responsibility for climate change and capability to address it should act the hardest and fastest. Countries disproportionately impacted by climate change must be an integral and respected part of the global decision-making process; they should take an active role in implementation of mitigation and adaptation, based on science and the principles of equity, as a matter of survival.

10. Even if a return to below 1.5°C is secured, many nations and communities will face irreversible losses and permanently changed conditions.

Impacts such as continued sea-level rise, species extinctions and ecosystem regime shifts may continue far beyond peak temperatures. Many communities may have relocated or changed livelihoods. Societies will face the challenge of readjustment: agricultural systems reconfigured for higher temperatures may need to be readapted; infrastructure designed for climate extremes may become mismatched; communities weakened by decades of crisis will face a second transition capacity; and maladaptation from mitigation may be an issue.

11. The legacy consequences of overshoot raise issues of justice, power and political legitimacy, which will require inclusive governance arrangements far beyond what most current climate governance envisions.

Governance arrangements at all scales will have to evolve to resolve difficult issues, such as deciding what gets rebuilt, how livelihoods are reconfigured, how loss and damage is addressed, and how the sovereignty and entitlements of SIDS and their peoples are respected even as their territories face increasing risk of uninhabitability.

12. Rapid, collective and global action is vital — with stronger political will, multilateralism and governance as key enabling conditions for all efforts.

Across both mitigation and adaptation, countries will need to strengthen international cooperation, align policies and institutions with the realities of overshoot, and substantially increase finance, technology transfer and capacity-building. Effective multilateralism will be essential to coordinate action across borders and generations, manage shared risks and ensure that countries with the least responsibility and capacity are not left to face the greatest burdens alone.

13. As an overshoot, peak and decline pathway could unfold over decades to centuries, subject to many unknowns, the discussion and efforts initiated by this report will need to evolve alongside the challenge.

The prospect of an overshoot pathway points to new frontiers for research and science to underpin and support better understanding, policy setting, governance and decision-making. The science, policies and institutions needed to navigate this pathway must therefore evolve as knowledge and conditions change. Particular attention is required to the poorly understood decline stage, the durability and equity of carbon removal, persistent and irreversible impacts, and adaptation as temperatures peak and later recede.

This report is not a definitive prescription, but a foundation for sustained research, learning, action and inclusive decision-making across generations.

The issues of equity and trade-offs require further research, learning and shaping as the baton is passed from generation to generation, across different geographies, and within countries and communities.


© ihar leichonak / Vecteezy

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 21

Introduction

Why this report?

The long-term objective of limiting warming to 1.5°C remains the foundation of international climate policy. For more than a decade, the global response to climate change has been organized around a shared objective: holding global warming "well below 2°C" above pre-industrial levels and pursuing efforts to limit it to 1.5°C (UNFCCC 2015a; UNFCCC 2015b). This objective, embedded in Article 2(a) of the Paris Agreement and reaffirmed in subsequent international decisions, remains the central benchmark for climate ambition. The goal of limiting global warming to 1.5°C has been further reinforced by international law. The International Court of Justice (ICJ) considers the "'1.5°C threshold to be the parties' agreed primary temperature goal for limiting the global average temperature increase under the Paris Agreement" (ICJ 2025). The United Nations General Assembly (UNGA) resolution adopted in 2026 (UNGA Res A/RES/80/L.65 2026) further reaffirmed this legal obligation.

The policy challenge has shifted from avoiding overshoot to navigating it. Scientific assessments (IPCC 2023a; UNEP 2025b) indicate that temporary exceedance of 1.5°C is inevitable under current emissions trajectories and policy settings. Therefore, the challenge confronting policymakers is no longer solely how to avoid exceedance, but rather how to understand, prepare for and navigate a future in which global temperatures exceed 1.5°C. Most importantly, society is now faced with the task of limiting exceedance through unprecedented action, for an overshoot, peak and decline pathway to be possible. In this pathway, the world faces the reality of global temperatures going beyond 1.5°C and collectively working towards limiting a temporary overshoot to well below 2°C so as to still make a decline feasible.

The decline stage depends on decisions made and actions taken today. This report does not assume that future outcomes are predetermined. Rather, it emphasizes that a 'decline' is not a given. Every fraction of a degree matters: the magnitude of peak warming, the duration of how long we stay above 1.5°C and the scale of resulting impacts remain strongly influenced by present actions. Every fraction of a degree avoided reduces risks. Every year by which overshoot duration is shortened reduces exposure. Every investment in resilience preserves future options.



Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 22

Box 1: Overshoot terminology

The term 'overshoot' has a variety of meanings. In everyday usage, overshoot refers to "the action or result of exceeding a limit or target" (Oxford English Dictionary [OED] 2024) or crossing a limit. However, in the scientific literature the shorthand term 'overshoot pathway' has been used to refer to a pathway that returns global warming below a specified limit after first having exceeded it for a certain amount of time (IPCC 2018b; IPCC 2022a; Schleussner *et al.* 2024; Reisinger *et al.* 2025). This poor alignment between the scientific and public understanding of the term overshoot is confusing. Therefore, a framing that distinguishes two separate challenges of scientific 'overshoot pathways' has been suggested (Schleussner *et al.* 2024): (i) halting global warming so that a peak in global warming is achieved; and (ii) reversing global warming until it returns back below the target level (in this case 1.5°C). This framing is referred to as an overshoot, peak and decline pathway.

Such pathways can be segmented in four stages. When pursuing efforts to limit warming to 1.5°C, an overshoot, peak and decline pathway is characterized by: first, a time when 1.5°C is crossed; second, the plateauing of global warming at a level above 1.5°C (and thus defining a peak in global warming); third, a period of global warming decline; and fourth, a period of global warming stabilization at a level below 1.5°C. Each of these stages comes with different implications for mitigation, adaptation, resilience and their associated challenges (see Section 1.6).

Throughout this report, the term overshoot in isolation refers to the crossing of 1.5°C of global warming, but more specific terms such as exceeding or crossing are preferred for clarity. Meanwhile, pathways that return global warming to or below 1.5°C after first having overshot are referred to in more explicit terms as 'overshoot, peak and decline pathways', sometimes abbreviated as 'overshoot pathways'.

Based on 'Practical guidance towards consistent use of overshoot terminology' (Rogelj *et al.* 2026)

Understanding overshoot pathways

Overshoot is a process, not a single threshold. An overshoot pathway that includes overshoot, peak and decline is often discussed as a physical climate phenomenon — as a threshold crossing. In reality, it is part of a dynamic process that will unfold over decades and involve several stages. Climate risks are shaped not only by global temperature outcomes, but also by how high temperatures rise, how long they remain elevated and how ecosystems and societies respond throughout the process (see Chapter 1).

Climate risks evolve differently across the stages of overshoot pathways. Peak warming matters because many climate impacts increase non-linearly with temperature. Duration matters because prolonged exposure compounds stress on ecosystems, infrastructure, institutions and communities with direct implications on how and whether they can rebound. Decline matters because some impacts may gradually lessen while others may persist for decades or centuries. Stabilization matters because future societies will inherit a world that will remain fundamentally altered even after temperatures begin to fall.

Planning must account for the full overshoot pathway. An overshoot pathway comprises four distinct but interconnected stages: exceedance, peak warming, decline and stabilization. Recognizing overshoot as a dynamic process rather than a single event is therefore essential for effective planning and decision-making.

Many existing planning assumptions no longer hold. Policies, institutions, finance and planning systems were designed around assumptions of gradual change, relative climatic stability and reliance on historical data for physical factors and projections for human factors. These assumptions cannot hold in a world in overshoot that introduces a different reality characterized by accelerating impacts, increasing uncertainty, threshold effects and growing interactions between environmental, social and economic risks. Some populations, ecosystems and sectors are also exposed to impacts driven by development elsewhere, without adequate capacity, skills, resources or financing to respond (O'Neill *et al.* 2022; Lamptey *et al.* 2024; Venner, García-Lamarca and Olazabal 2024). These distributional dimensions must be central to planning for the exceedance, peak, decline and stabilization stages and not treated as equity considerations to be addressed after the primary technical response (Birkmann *et al.* 2022; Mycoo *et al.* 2022; O'Neill *et al.* 2022).

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 23

Adaptation must become iterative rather than static. As temperatures rise and impacts intensify, many planned and established measures may become ineffective, pushing systems toward soft and hard adaptation limits and increasing the likelihood of crossing critical tipping dynamics associated with exceedance and response actions. Without redesign, current adaptation pathways risk widespread maladaptation and the reinforcement of existing, or introduction of new, vulnerabilities and inequities. In a world in overshoot and decline, decision-makers will increasingly confront situations in which historical experience provides limited guidance for future conditions (Milly *et al.* 2008). Adaptation and mitigation decisions may need to be revised repeatedly, at different levels of governance as infrastructure lifetimes may exceed the validity of current design assumptions (Milly *et al.* 2008; Hallegatte *et al.* 2012; Theokritoff *et al.* 2026).

Overshoot is as much a governance challenge as a climate challenge. Its implications extend far beyond the climate system itself to governance, planning, finance, development pathways and intergenerational responsibility. In the 1980s, there was already an indication of the negative impacts of anthropogenic climate change and political priorities then could have averted the damage that is currently locked in (Stoddard *et al.* 2021). The trajectory from exceedance to stabilization will likewise depend on policy choices made today. Infrastructure, food systems, human settlements, ecosystems and public investment have traditionally been designed around assumptions of relative climatic stability and historical experience. Overshoot challenges those assumptions and requires institutions capable of operating under increasing uncertainty, changing risks and evolving climate conditions.

The stages of overshoot provide a temporal thread across the report. The chapters therefore return at several points to impacts, mitigation, adaptation and governance — not as discrete or sequential agendas, but to examine how their roles, constraints and interactions evolve through exceedance, peak warming, decline and stabilization. This deliberate recurrence reflects the need to revisit decisions and response options as climatic, ecological and societal conditions change.

Every fraction of a degree matters, every investment matters

Overshoot reinforces the need for climate action. The inevitable overshoot of 1.5°C should not be interpreted as justification for reduced ambition. On the contrary, it reinforces the urgency of accelerated climate action. The lower the peak warming reached, and the shorter the duration of exceedance, the lower the risks faced by people and ecosystems.

Mitigation and adaptation are complementary, not sequential. Mitigation remains essential because it determines the scale and duration of future climate risks. It also limits the magnitude and duration of overshoot. Adaptation remains essential because climate impacts are already occurring and additional warming is unavoidable. Neither can substitute for the other. Effective responses require mitigation, adaptation and resilience-building efforts to advance together.

Overshoot pathways inform decisions under uncertainty. While the pathways examined in this report should not be interpreted as predictions of a predetermined future, they represent scientifically informed scenarios that illuminate potential risks, opportunities and decision points. Although uncertainty remains regarding the timing, magnitude and distribution of future impacts, the evidence consistently indicates that higher peak warming and longer durations of exceedance are associated with greater risks for people and nature. For example, adaptation and mitigation decisions may need to be revised repeatedly, at different levels of governance as infrastructure lifetimes may exceed the validity of current design assumptions (Milly *et al.* 2008; Hallegatte *et al.* 2012; Theokritoff *et al.* 2026).

Even 1.5°C carries substantial risks. A key point often underemphasized is that 1.5°C global warming (IPCC 2018a) is not considered safe for most nations, communities, ecosystems and sectors, and still poses significant risks to natural and human systems (Chapter 2 and 4). Global warming beyond 1.5°C is expected to amplify non-linear increases in impacts, compounding their complexity and disproportionately affecting Least Developed Countries, (LDCs) SIDS, the poor and

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 24

vulnerable (see Chapter 2). This means that even if warming eventually returns to or below 1.5°C, substantial adaptation needs will remain.

Today's decisions determine tomorrow's risks. These challenges reinforce the importance of accelerating mitigation. The lower the peak warming reached, the lower the risks faced by people, societies, economies and ecosystems. The shorter the duration of overshoot, the lower the probability of crossing irreversible thresholds and adaptation limits. The sooner emissions decline, the greater the opportunities to reduce future losses and damages (Chapter 3). Mitigation therefore remains indispensable because it determines the scale and duration of future climate risks (Chapter 3).

The central lesson throughout this report is that mitigation and adaptation should not be sequenced; they must advance together. Overshoot is therefore not an argument for resignation, but for urgency.

In a world where temporary exceedance is inevitable, every fraction of a degree avoided, every year by which overshoot is shortened and every investment in mitigation, adaptation and resilience helps keep the goals of the Paris Agreement within reach and protects human, economic and environmental health.


© ahmed hedayet / Vecteezy

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 26

01 Entering an era of 1.5°C overshoot

Impacts of a world at and beyond 1.5°C are already emerging. These include: accelerating ecosystem and cryosphere loss, intensifying extreme weather and increasing harms to vulnerable populations. The evidence indicates that 1.5°C cannot be considered safe, and that even temporary exceedance will result in substantial and often irreversible impacts.

Reversing global warming after exceeding 1.5°C is theoretically possible. However, it would require sustained net-negative carbon dioxide (CO_2) emissions at globally relevant scales over decades to centuries, supported by deep reductions in methane. Achieving the former would require avoiding CO_2 emissions as much as possible while scaling CO_2 removal methods. Achieving the latter would require substantial advances in reducing 'hard-to-abate' methane emissions, particularly from agriculture. The feasibility of achieving both at the required scale remains uncertain. As any global warming reversal would unfold only gradually over multiple decades, adaptation decisions are most sensibly guided by climate risks between 1.5°C exceedance and expected peak warming. However, achieving reversal would bring important long-term benefits, especially for reducing risks from sea-level rise and potential destabilization of tipping elements such as the Greenland and West Antarctic ice sheets.

Responding to overshoot of 1.5°C requires action across three response phases. The first is an immediate response phase, requiring urgent measures to protect vulnerable populations from foreseeable impacts of the imminent exceedance of 1.5°C while rapidly reducing emissions to slow warming. The second, a coping and containment phase—beginning in parallel—focuses on advancing climate resilience in a world above 1.5°C alongside sustained deep decarbonisation towards net zero in which global warming is halted. The third, a long-term resilience phase, follows net-zero CO_2 and peak warming, combining sustained net-negative CO_2 emissions and further methane reductions with continued adaptation and broader efforts to strengthen sustainability and societal resilience. Across all three response phases, mitigation and adaptation are deeply interdependent and must advance together to deliver climate resilient development.

1.1 Global warming approaching 1.5°C

Staying below 1.5°C is the preferred outcome. The long-term temperature goal of the Paris Agreement and the Climate Change Convention refers to two global warming limits (Mace 2016; Rajamani and Werksman 2018). The 2021 Glasgow Climate Pact focused attention more firmly onto pursuing efforts to limiting warming to 1.5°C (UNFCCC 2021) and, most recently, the International Court of Justice in its Advisory Opinion on the Obligations of States in Respect of Climate Change stated that it "considers the 1.5°C threshold to be the parties' agreed primary temperature goal […] under the Paris Agreement" (ICJ 2025, para. 224) (See In Focus: Legal implications of 1.5°C overshoot pathways).

However, exceedance of 1.5°C is coming in the next few years.

Human-induced global warming is nearing 1.4°C above pre-industrial levels, and observed global temperatures have been increasing at about 0.25°C per decade (Forster *et al.* 2026), with some recent studies showing an even higher rate (Foster and Rahmstorf 2026). Extrapolating current trends, global warming may reach 1.5°C around the end of this decade. A recent operational decadal forecasts (WMO 2026) assigned 3-in-4 chance that

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 27

the 2026–2030 five-year mean in global temperatures (reflecting the combined effect of human-induced warming and natural variability) will exceed 1.5°C. Taken together, the available evidence suggests that the central estimate of human-induced global warming will be crossing 1.5°C above pre-industrial levels in the next few years. The remaining carbon budget—the total amount of CO_2 that can still be emitted while meeting a specified temperature goal—continues to be revised downward as global emissions continue to consume it, and science is updated. To have a 50 per cent chance of limiting global warming to 1.5°C, only about 130 billion tons of CO_2 ($GtCO_2$) can be emitted from 2026 onwards (Forster *et al.* 2026). However, emissions remain at record highs. In 2024 alone, fossil fuels and industry produced around 40 $GtCO_2$ (Friedlingstein *et al.* 2025). At this rate, the remaining carbon budget for staying within 1.5°C would be exhausted in roughly three years. Put differently, to remain within this budget, global CO_2 emissions would need to decline linearly from 2025 levels to zero in just over six years.

Every year of high emissions makes limiting overshoot more difficult. Global mean temperature increase is approximately linearly proportional to cumulative CO_2 emissions (Canadell *et al.* 2021), and temperatures stabilize when net CO_2 emissions reach zero (IPCC 2021). The earlier net-zero CO_2 is achieved—and the fewer CO_2 emissions emitted until that point—the lower the eventual peak temperature. Concurrent reductions in non-CO_2 greenhouse gases (GHGs), particularly of short-lived methane emissions, can further limit peak warming and affect the timing of net-zero CO_2 aligned with a given temperature outcome (Rogelj *et al.* 2014; Reisinger *et al.* 2021; Ou *et al.* 2021a; Riahi *et al.* 2022).

Every five years of high emissions adds 0.1°C to peak warming. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)'s quantification of the relationship between cumulative CO_2 emissions and global warming means that each additional five years of sustained high emissions adds approximately 0.1°C to peak warming[1] (Canadell *et al.* 2021; UNEP 2025b). Consequently, the more than 400 $GtCO_2$ of cumulated CO_2 emitted since 2015 (Friedlingstein *et al.* 2025) have already increased the lowest achievable warming by about 0.2°C.

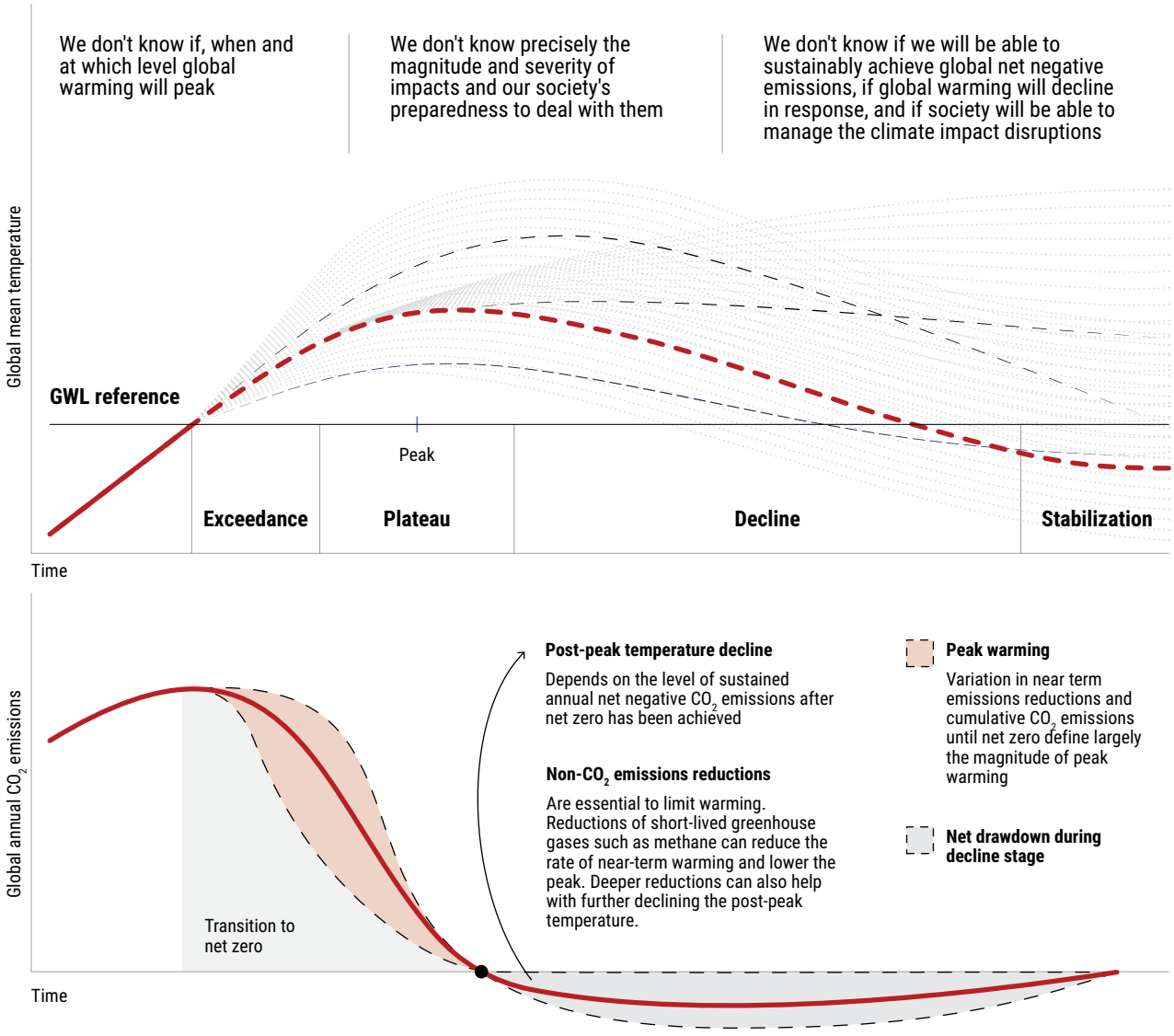


Milos Bicanski / Climate Visuals Countdown

1 This value of a 0.1°C increase per five years of delay is based on the central estimate of the transient climate response to cumulative emissions of CO_2 (TCRE), which indicates the amount of global warming that is caused per unit of CO_2 that human activities add to the Earth's atmosphere. The IPCC AR6 WGI reports a ***likely*** (>66 per cent) range of 0.27–0.63°C per 1000 $GtCO_2$ for the TCRE with a best estimate of 0.45°C (Canadell ***et al.*** 2021). These values indicate that a best estimate of 220 $GtCO_2$ causes 0.1°C of global warming. Current global CO_2 emissions exceed 40 $GtCO_2$ (UNEP 2025b), and more than 200 $GtCO_2$ will therefore be emitted over the course of five years.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 28

Figure 1.1: Key pathway concepts



- Dotted lines illustrate alternative futures from different starting points
- Global annual CO_2 emissions refer to net emissions.

1.2 Futures lost and futures still available

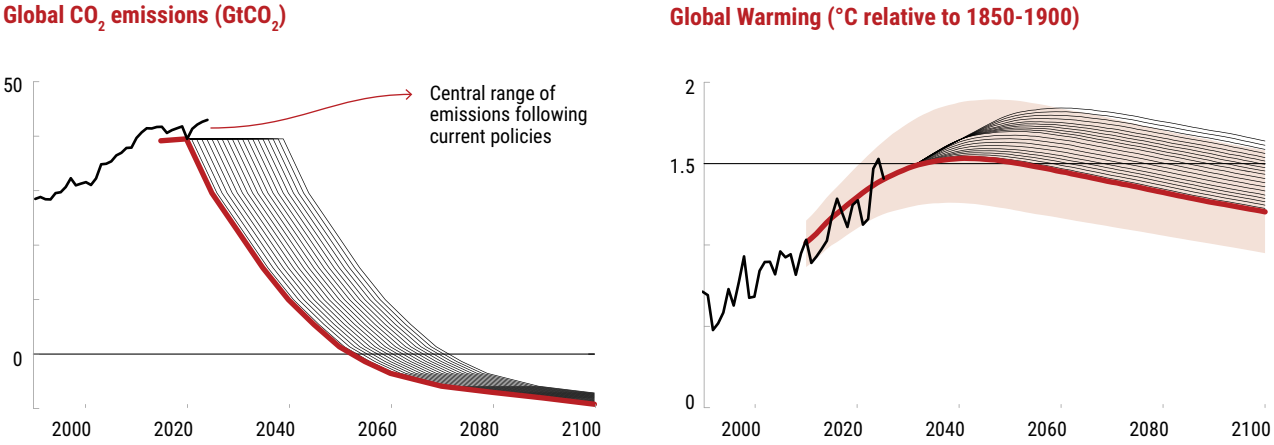
Inadequate action means that emissions trajectories are inconsistent with 1.5°C. Emissions have continued to rise towards historically high levels (UNEP 2022; UNEP 2025b). Although emissions dipped temporarily during the COVID-19 pandemic, they have since rebounded as expected (UNEP 2022; UNEP 2025b). Current policies and emissions reduction targets in place as of the mid-2020s are projected to result in emissions in 2030 substantially above levels required for 1.5°C-consistent pathways, leaving a pronounced "emissions gap" (UNEP 2025b). Under current policies and alternative near-term trajectories, exceedance of 1.5°C is now widely assessed as unavoidable. Key concepts related to the exceedance of a temperature target and possible pathways thereafter are presented in Figure 1.1.

Immediate and deep cuts to greenhouse gases are needed. Pursuing efforts to limit warming to 1.5°C—while minimizing the magnitude and duration of overshoot—requires immediate and deep emissions reductions across all sectors**.** Even before 1.5°C was formally part of an international climate target, both UNEP and the



IPCC had already identified emissions pathways and GHG benchmarks consistent with low-temperature stabilization and with keeping 1.5°C within reach (UNEP 2013; IPCC 2014; UNEP 2014; UNEP 2015). These benchmarks have evolved as the evidence base has expanded and definitions have been refined. However, they have consistently implied strong GHG emission reductions relative to recent levels, with 2030 GHG benchmarks of 40 $GtCO_2e$/yr or lower[2] (Rogelj *et al.* 2018a; UNEP 2018; UNEP 2019; UNEP 2020; UNEP 2021; Riahi *et al.* 2022). Beyond 2030 benchmarks, studies have emphasized the importance of longer-term GHG reductions, including achieving net-zero CO_2 emissions around mid-century and net-zero GHG emissions in the second half of the century (Rogelj *et al.* 2015; Rogelj *et al.* 2018a; Riahi *et al.* 2022).

Figure 1.2: Futures available and futures lost



Every year of delay in emissions reductions (left) adds to the magnitude of overshoot of 1.5°C (right). Central projections of global greenhouse gas emissions under current policies do not yet indicate a clear decline and continue to exacerbate overshoot of 1.5°C.

Illustration of how delays in global reductions of greenhouse gas emissions increase the magnitude of overshoot. Bold red lines show data for emissions reductions starting in 2020, the thin black lines show the outcome of delay.

2 Global Warming Potentials over a time horizon of 100 years (GWP-100) are used to aggregate GHG emissions into CO_2 equivalence (CO_2e), consistent with reporting requirements under the UNFCCC and the Paris Agreement (UNFCCC 2018).

National climate pledges are nowhere near sufficient. Analysis of mitigation pledges submitted as part of countries' nationally determined contributions (NDCs) under the Paris Agreement reveals a substantial emission gap. Both the first and second round of NDCs submitted since the Paris Agreement's entry into force were projected to result in a continued increase in global GHG emissions[3] (Rogelj *et al.* 2016; UNEP 2016; Ou *et al.* 2021b; UNEP 2021). Assuming full implementation of the most recent, third-round NDCs as submitted by September 2025, global GHG emissions are projected to decline slightly from their record 2024 levels to around 51 $GtCO_2e/yr$ in 2030, but still leaving a substantial emissions gap (UNEP 2025b).

Implementation of existing pledges is weak. A further challenge is the persistent implementation gap between pledged emission reductions and policies currently in place to deliver them. Under currently implemented or planned policies, global emissions are projected not to decline but to remain broadly stable through 2030 (UNEP 2025b). In both cases, the outlook to 2030 remains markedly above levels consistent with pathways that limit warming below 2°C, let alone return it to 1.5°C by 2100 after a limited overshoot. The existence of both ambition and implementation gaps has been consistently highlighted in scientific assessments over many years (UNEP 2015; UNEP 2016; UNEP 2017; UNEP 2018; UNEP 2019; UNEP 2020; UNEP 2021; UNEP 2022; UNEP 2023; UNEP 2024b; UNEP 2025b).

The persistence of this gap comes with three consequences:

First, recent UNEP estimates indicate that 1.5°C will be exceeded across all central estimates. Under current policies, median projected global warming reaches around 2.6°C by 2100 (range 1.9–3.6°C).[4] Even under one of UNEP's most optimistic scenarios, which assumes implementation of all NDCs and long-term net zero targets, central global warming estimates peak at around 1.8°C (range 1.7–2.2°C). In all cases, central estimates indicate that global warming will cross 1.5°C within the next decade.[5]

Second, the most stringent emission reduction pathways that were available around the time of the Paris Agreement are no longer feasible (Figure 1.2). Such pathways required immediate, deep and sustained global GHG emissions reductions to start as early as 2015 or 2020, included rapid declines in both CO_2 and non-CO_2 GHG emissions and reached global net-zero CO_2 around mid-century (UNEP 2015; Rogelj *et al.* 2018a). Even under these conditions, most studies indicated that warming would temporarily exceed 1.5°C before being reversed back below 1.5°C by 2100 (Rogelj *et al.* 2018a; Rogelj *et al.* 2018b; Riahi *et al.* 2022; Tavoni *et al.* 2026).[6] More recent studies that account for delayed action over the past ten years, institutional constraints and technological feasibility show that even stringent mitigation pathways starting around 2025 result in best-estimate peak warming exceeding 1.5°C by about 0.2°C (Bertram *et al.* 2024; Hooijschuur *et al.* 2025; Riahi *et al.* 2026). Strengthening near-term ambition therefore remains central to limiting both peak warming and the duration of overshoot (Rogelj *et al.* 2019; Iyer *et al.* 2022).

3 NDC targets are typically categorised in unconditional and conditional targets. Conditional targets are targets that are accompanied by certain conditions that need to be met first, such as ensuring the availability of finance or technology transfer. Full implementation of NDCs means that both unconditional and conditional targets in NDCs are implemented.

4 These estimates refer to central (median) global warming projections, with the range illustrating the indeterminacy in estimating how emissions will evolve beyond the years for which there are explicit assessments (e.g. 2030). Note that for ease of communication, the median estimates of global warming for each case are referred to here, while the UNEP Emissions Gap reports focus their reports on the level of global warming that would be avoided with a greater than 66 per cent probability.

5 In the more optimistic UNEP case, highlighted in the main text, projection uncertainty still encompasses 1.5°C, but only with a low (~20 per cent) probability.

6 These pathways were referred to as pathways limiting warming to 1.5°C with no or limited overshoot in the IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C (Rogelj ***et al.*** 2018a) and as C1 pathways in IPCC AR6 (Riahi ***et al.*** 2022).

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 31



Third, delayed action has pushed the lowest avoidable peak warming above 1.5°C. While options for deep emissions reductions from 2025 onwards remain available, a decade of insufficient action and persistently high emissions has increased the minimum level of peak warming.

1.3 The climate impacts of entering a 1.5°C world

A temperature rise of 1.5°C is already dangerous. A 1.5°C world is already associated with high to very high risks across natural and human systems**.** In its Sixth Assessment Report (AR6), the IPCC provided a comprehensive assessment of the key risks and "Reasons for Concern" for a global warming level of 1.5°C that serves as the point of departure for this report. Specifically, it identified high to very high risks for unique and threatened systems including coral reefs and other biodiversity hotspots as well as the cryosphere, including the Arctic and mountain glaciers. In the IPCC's assessment, very high risks imply "severe impacts and the presence of significant irreversibility or the persistence of climate-related hazards, combined with limited ability to adapt due to the nature of the hazard or impacts/risk". At the time of the IPCC AR6, the 1.5°C global warming level—defined as a 20-year average—had not yet been reached. After the first individual year with a global mean temperature above 1.5°C in 2024, the world has now entered a 20-year period with mean warming of 1.5°C (Bevacqua, Schleussner and Zscheischler 2025).

Many of the impacts assessed in AR6 are beginning to unfold. Between 2023 and 2025, more than 80 per cent of tropical coral reefs experienced bleaching events and mass coral bleaching has been documented in at least 83 countries and territories (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA] 2025b). Climate change-driven global biodiversity loss is also accelerating (Urban 2024). In February 2025, combined Arctic and Antarctic sea ice reached a new all-time minimum (Copernicus Climate Change Service [C3S] 2025), and the oldest and thickest multi-year ice has decreased by over 95 per cent since the 1980s (NOAA 2025a). Of total global glacier loss since the 1970s, more than 40 per cent occurred in the last decade (2015–2024), with 6 per cent lost in 2023 alone (Dussaillant *et al.* 2025).

Extreme weather is already intensifying. The IPCC AR6 assessed the risks posed by extreme weather events to be high at 1.5°C, with unprecedented events emerging that would have been virtually impossible without global warming (Philip *et al.* 2022). Such events are becoming more frequent, intense and widespread. Over the past two decades, more than 50 unprecedented, high impact heatwave events have been documented (Quilcaille *et al.* 2025). Simultaneously, global warming has increased the likelihood and intensity of tropical cyclones, as well as many flood, drought and wildfire events (Otto, F. *et al.* 2025). From May 2024 to May 2025, about half of the world's population experienced at least 30 days of extreme heat — defined as days hotter than 90 per cent of temperatures observed in their local area over the 1991–2020 period (Giguere *et al.* 2025). As a consequence, heat-related mortality is rising globally (Matthews *et al.* 2025). For example, heat-related deaths during a European summer heatwave in 2025 were estimated to have tripled with this increase being attributed to global warming (Clarke *et al.* 2025).

Limits to adaptation are being reached. The IPCC AR6 also identified soft limits to adaptation that are already being reached, particularly for the most vulnerable communities. Escalating ecosystem impacts—such as

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 32

the documented widespread bleaching of tropical coral reefs—indicate that in a 1.5°C world, some ecosystem-based adaptation measures will increasingly reach hard adaptation limits (IPCC 2022c). Chapter 2 of this report further assesses the impacts of exceeding 1.5°C and the extent to which they may be reversible during a subsequent period of temperature decline.

1.4 Global warming reversal after overshoot

The goal remains 1.5°C. The pursuit of 1.5°C endures as a legal and ethical imperative (Rogelj and Rajamani 2025). However, as global warming exceeds 1.5°C, efforts to limit warming to this level from above necessarily include an element of global warming reversal (cf. Section 1.1).

Net-zero is a necessary milestone to returning below 1.5°C. Under the Paris Agreement, countries aim to collectively achieve a balance of emissions and removals of all GHGs in the second half of this century — that is, net-zero GHG emissions.[7] Following the GHG aggregation method under the Paris Agreement framework, this implies net-negative CO_2 emissions and is therefore expected to result in a gradual decline in global warming (Fuglestvedt *et al.* 2018; IPCC 2021).

The contribution of non-CO_2 GHGs is time-bound. Reductions in methane—the most important short-lived GHG—are a key part of deep mitigation strategies (IPCC 2018a; IPCC 2022b). Cost-effective near-term methane reductions can lower both the rate of warming over the next decades and the warming peak (Rogelj *et al.* 2014; CCAC and UNEP 2021) while delivering gains for air quality and public health (CCAC and UNEP 2021). However, if this near-term mitigation potential is effectively utilized, further contributions from methane emission reductions to the reversal of global warming are limited and would require addressing 'hard-to-abate' methane emissions, particularly in the agricultural and waste sectors (see Chapter 3).

Carbon Dioxide Removal (CDR) will be needed to offset remaining emissions. The physics of a global warming decline are similar to the physics governing our current increase in warming: anthropogenic GHG emissions alter the Earth's radiative balance. When net CO_2 emissions reach zero, CO_2-induced warming is expected to stabilize (IPCC 2021). Achieving this balance requires carbon dioxide removal (CDR) to offset any remaining CO_2 emissions (IPCC 2022b). To reverse warming requires CDR to exceed residual CO_2 emissions resulting in sustained net-negative CO_2 emissions that may gradually lower global temperatures (IPCC 2021; see also Chapter 3).

CDR deployment is needed to reach even net-zero, but faces challenges. IPCC AR6 highlighted that any strategy to reach net-zero CO_2 emissions relies to some degree on CDR, often in the order of several billion tons of CO_2 removed per year (IPCC 2022b).[8] In these strategies, CDR is primarily used to balance residual emissions and must be scaled further to achieve net-negative CO_2 emissions and enable temperature decline. However, CDR methods vary in durability, resource requirements and scalability (Smith *et al.* 2024), and are often considered as a portfolio of approaches. Their deployment is shaped by biophysical, economic, governance and societal factors, including public perceptions related to their feasibility, legitimacy and potential mitigation deterrence. CDR deployment can also result in trade-offs with sustainable development goals, and sustainability limits to their deployment over the course of this century have been identified in the literature (Deprez *et al.* 2024), as well as legal and governance constraints (Stuart-Smith *et al.* 2023).

7 This expectation is captured in Paris Agreement article 4.1 which sets out that "In order to achieve the long-term temperature goal set out in Article 2, Parties aim to reach global peaking of greenhouse gas emissions as soon as possible, recognizing that peaking will take longer for developing country Parties, and to undertake rapid reductions thereafter in accordance with best available science, so as to achieve a balance between anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases in the second half of this century, on the basis of equity, and in the context of sustainable development and efforts to eradicate poverty."

8 IPCC AR6 WG3 highlights in its Summary for Policymakers that "C.3.3 In modelled pathways that reach global net zero CO_2 emissions: at the point they reach net zero, 5–16 $GtCO_2$ of emissions from some sectors are compensated for by net negative CO_2 emissions in other sectors."

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 33

Reversing global warming will be a slow and difficult process. Approximately 220 $GtCO_2$ of cumulative net-negative emissions are required to lower global temperatures by around 0.1°C (UNEP 2025b). Consequently, the sustainable rate at which CO_2 can be removed from the atmosphere is a key determinant of the net-negative CO_2 emissions achievable, which in turn determines the pace of temperature decline (cf. Chapter 3). Even under scenarios where net-negative CO_2 emissions reach 10 $GtCO_2$ per year, or around a quarter of present-day CO_2 emissions, warming may only reverse by about 0.05°C per decade (Rogelj *et al.* 2019). In other words, a decade of global warming at the current rate of about 0.25°C per decade (Forster *et al.* 2026) may take about 50 years to reverse, even under optimistic CDR assumptions. Current deployment remains well below these levels: over the past decade, durable land-based CDR averaged about two $GtCO_2$ per year, while novel CDR methods, which use technologies to capture and store carbon, removed amounts around one-thousandth of that amount (Smith *et al.* 2024).


© Florian Fussstetter / UNEP

A return to below 1.5°C is deeply uncertain. These various challenges in achieving a reversal in global warming have led the scientific literature to highlight uncertainties and potentially optimistic assumptions in current overshoot discussions (Schleussner *et al.* 2024). In addition to CDR scale-up challenges, net-negative emissions may be less effective in reversing global warming than central estimates suggest. Numbers cited previously in this section assume a symmetric climate response to emissions and removals, yet this assumption might not hold in a warmer and more impacted world. While warming is expected to stabilize when net-zero CO_2 emissions are reached (IPCC 2021), additional warming under certain Earth system feedbacks cannot be excluded (Palazzo Corner *et al.* 2023). Uncertainty also remains as to whether the cooling effect of CO_2 removals matches the warming caused by comparable CO_2 emissions: earlier studies suggest it may be less (Zickfeld *et al.* 2021), while preliminary recent findings indicate that it could also be more (Chimuka and Zickfeld 2026).

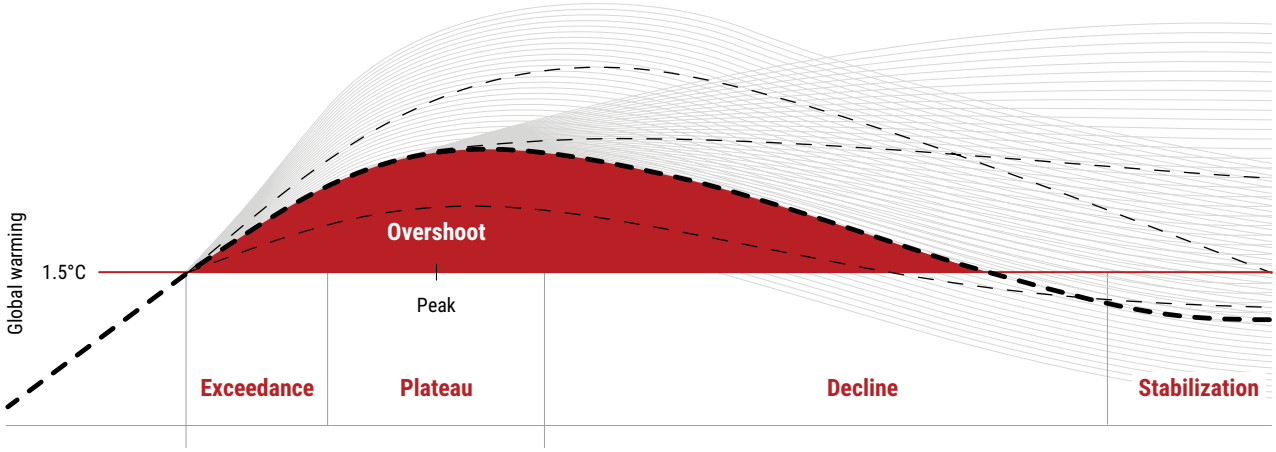
Emissions reductions are the priority. The uncertainties above can increase the challenge of achieving an overshoot, peak and decline pathway when they rely on increasing amounts of CDR for warming stabilization and reversal. For instance, if the climate response is at the higher end (around the 75th percentile), several hundred gigatons of additional net CDR may be required to achieve the same temperature outcome as under median-response assumptions for the same emissions pathway (Schleussner *et al.* 2024). Given limits on sustainable annual CDR deployment (Deprez *et al.* 2024), this would likely extend the duration of temperature overshoot rather than be met through higher annual deployment rates. A prudent response therefore anticipates potential adverse outcomes (Ganti *et al.* 2025), clarifies the required scale and portfolio of responsibly deployed CDR, and prioritises rapid near-term emissions reductions—including limiting 'hard-to-abate' emissions—to minimize climate harm. Limiting the magnitude of overshoot is critical to ensure warming reversal remains feasible on timescales shorter than a century.

In conclusion, coming back is possible, but uncertain and complex. Reversal of global warming after an overshoot is possible but would require sustained net-negative CO_2 emissions over extended periods. Its effects remain contingent not only on Earth system responses but

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 34

also on governance capacity, institutional coordination and the practical conditions shaping large-scale CDR deployment. The pace of temperature reversal therefore remains uncertain and constrained. The most effective risk management strategy is to reduce emissions rapidly in the near term and progress towards net zero as early as possible, thereby limiting peak warming and the duration of exceedance. Proactive adaptation is equally essential – not only to reduce harms but also to maintain capacity to sustain mitigation efforts under the increasing pressures associated with overshoot.

Figure 1.3: Key determinants of overshoot peak and decline pathway outcomes down to the impact chain



Key determinants of overshoot, peak and decline pathway outcomes

Global temperature outcomes	• Near-term emission reductions • Non-CO_2 emission reductions • Timing of net-zero CO_2	• Achieving (and sustaining) net negative CO_2 • Maximum sustainable carbon dioxide removal potential
Climate impacts and risks	Earth system feedbacks and transient climate response	• Earth system feedbacks beyond net-zero CO_2 • Zero Emissions Commitment • Reversibility of global warming
Adaptation and loss and damage	• Scaling of climate impact drivers with global warming • Crossing of irreversible thresholds	• Time lagged responses • Irreversible impacts • Timescales of climate impact driver reversibility
Adaptation and loss and damage	• Urgent near-term adaptation needs • Limits to adaptation (hard and soft) • Loss and damage at peak warming	• Continuous adaptation needs to irreversible changes • Avoided loss and damage by declining warming

Source: Adapted from Schleussner *et al.* 2024

1.5 Climate impact (ir)reversibility and the benefits of long-term global warming reversal

A comprehensive view is needed. Evaluating the implications of exceeding, peaking and subsequently declining global warming requires understanding the full impact chain: from emissions to regional and local scale consequences over different timescales. In particular, the dynamics during the near-term stage until net-zero emissions, and a subsequent decline stage may differ considerably in their dynamics and are shaped by technological, societal and scientific challenges.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 35

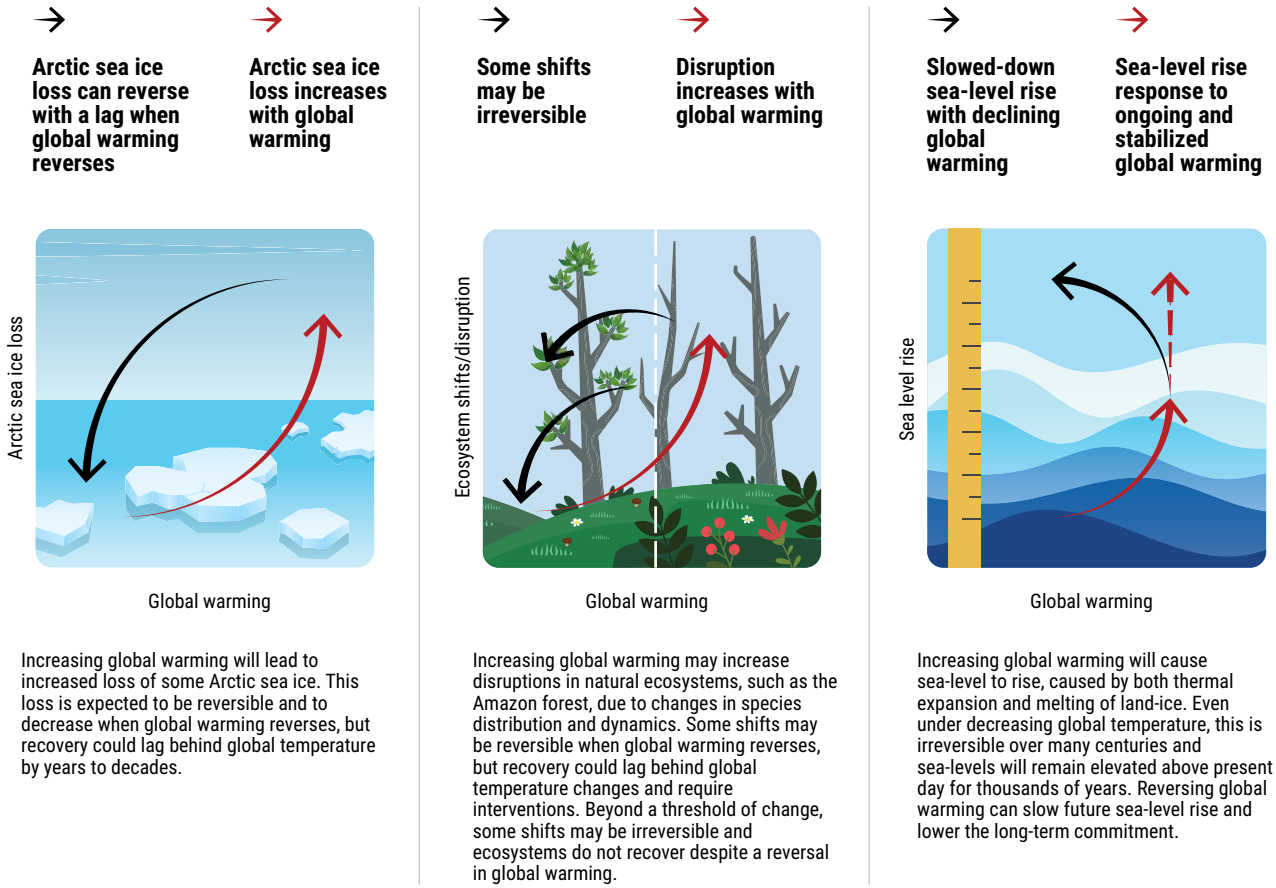
Decades above 1.5°C will bring major implications for adaptation. A 1.5°C overshoot, peak and decline pathways extend to the end of the century or beyond. Even under optimistic assumptions about global temperature decline, it would take multiple decades before global temperatures return to below 1.5°C — beyond the planning horizons relevant for many adaptation decisions (with the notable exception of long-lived infrastructure planning). As a result, adaptation needs and costs will largely be determined by climate risks at peak warming, while additional adaptation needs will arise under long-term reversal and stabilization (Theokritoff *et al.* 2026). This underscores the deep interdependence between near-term adaptation and mitigation action.

A decline in global mean temperature will not reverse all regional climate harms. Regional climate change can differ before and after peak warming, even at the same level of global warming, with far reaching implications for climate risk assessments and adaptation needs. Even indicators that generally closely follow global warming trajectories, such as regional temperatures, may differ before and after peak warming (Pfleiderer, Schleussner and Sillmann 2024). In many regions, regional precipitation patterns show limited reversal under global temperature decline, as do changes in extreme event indicators such as extreme day and nighttime temperatures, as well as extreme precipitation (Pfleiderer, Schleussner and Sillmann 2024). At the same time, global warming reversal will be essential to reduce long-term climate risks, subsequent adaptation investment needs, and to avoid exceeding adaptation limits.



Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 36

Figure 1.4: Reversible, partially reversible and irreversible dynamics of Earth system components under global warming decline



Source: Adapted from Reisinger *et al.* 2025

Impacts will continue after stabilization. Many components of the climate system—in particular ocean and cryosphere dynamics—will respond with considerable time lags to changes in global mean surface air temperature. Adjustments in the hydrological cycle, atmospheric circulation and major ocean circulations such as the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) are projected to continue for centuries well after emissions have ceased (Lacroix *et al.* 2024). Consequently, regional climate changes will continue even under conditions of global temperature stabilization (King *et al.* 2024).

Many impacts will be irreversible. Slow-responding components of the Earth system—such as permafrost thaw, glacier land ice sheet loss, and sea level rise—are particularly prone to impact irreversibility. Yet, it is in these components where global warming reversal can yield substantial benefits in terms of avoided long-term consequences. Under peak and decline pathways, permafrost carbon losses may be irreversible, even if permafrost areas may partially recover under global warming reversal (Cui, Ji and Chen 2025). Global glacier loss is projected to continue for centuries even if global warming were stabilized at current levels (Zekollari *et al.* 2025). Exceeding and returning to below 1.5°C will have additional, irreversible consequences for glacier mass and runoff over centuries, but reduces glacier loss compared to a stabilization at higher level (Schuster *et al.* 2025).

Sea levels will continue to rise for centuries in response to past warming. Overshoot pathways commit the world to long-term increases in coastal water levels. Achieving long-term temperature decline compared to stabilization at higher warming levels may reduce long-term sea-

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 37

level rise by almost half a meter in 2300, with larger differences over longer timescales (Schleussner *et al.* 2024).

Triggering tipping elements could lead to irreversible changes. The potential to reduce long-term risks in slow-responding Earth system components through global warming reversal is especially relevant for tipping elements — large-scale systems that may undergo irreversible change once critical thresholds are crossed (Ritchie *et al.* 2026). These include the West Antarctic and the Greenland ice sheets, the AMOC and the climate-biosphere system of the Amazon rainforest (Armstrong McKay *et al.* 2022). While thresholds and response times remain uncertain, evidence increasingly indicates that sustained warming above 1.5°C raises the risk of triggering one or more tipping elements (Wunderling *et al.* 2023; Stokes *et al.* 2025). Achieving and maintaining net-zero GHGs, and thereby achieving global warming reversal, will be required to limit risks posed by climate tipping elements in the long run (Möller *et al.* 2024).

The Atlantic Meridional Overturning Circulation is projected to slow down. Limiting peak warming to less than 2°C may limit the overall weakening considerably compared to higher levels of warming (Portmann *et al.* 2026). With increasing peak warming, there is a growing risk of a long-term collapse of the circulation system (Drijfhout *et al.* 2025). Further, if such a tipping could be avoided, long-term AMOC changes in response to an overshoot, peak and decline pathway need to be expected. In model projections, the AMOC is found to recover on the timescale of centuries, and, under overshoot pathways with high peak warming, even shows periods of recovery beyond pre-industrial levels (Schwinger *et al.* 2022; Lacroix *et al.* 2024).

Many other natural systems face irreversible impacts. Ecosystems that are fundamentally disturbed in their function will not recover, species that go extinct, locally or even globally will not reappear (Meyer and Trisos 2023). Likewise, many impacts on human systems cannot be reversed. These include excess mortality and morbidity associated with climate extremes (Vicedo-Cabrera *et al.* 2018), the loss of cultural practices such as the Hajj pilgrimage under extreme heat (Saeed, Schleussner and Almazroui 2021), the inundation of UNESCO World Heritage sites (Marzeion and Levermann 2014) and lasting reductions in economic activity and productivity.

Global warming reversal will play out against these ongoing changes. The scale of climate change reversibility will also depend on the level of peak warming and duration of temperature overshoot (Schwinger *et al.* 2022; Lacroix *et al.* 2024). The higher the peak warming and the longer the overshoot period, the more persistent and durable the consequences.

The societal consequences will grow and evolve. Population composition and size, economic development and adaptive capacity, and technological progress are expected to change profoundly during this century. As a result, the consequences of the same level of global warming may differ before and after peak warming because societies themselves will have changed. Today's youth will face a triple burden over the course of their lifetime: tackling the consequences of the exceedance of 1.5°C, expediting the transition to net zero and striving for long-term warming reversal (Grant *et al.* 2025a).

Even temporary exceedance of 1.5°C will leave irreversible losses. These irreversible losses—even with a temporary exceedance of 1.5°C—underscore that a warming of 1.5°C and above cannot be considered 'safe' for most nations, communities, ecosystems and sectors and poses significant risks to natural and human systems (IPCC 2018a). The evidence of the benefits of long-term warming reversal is compelling. Permanent stabilization of global warming at levels above 1.5°C would further cement human and ecosystem losses, and commit humanity to very profound long-term risks including through potential tipping element destabilization and continued sea-level rise.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 38



1.6 Adaptation and mitigation must move together in tackling overshoot

Responding in three phases. The prospect of crossing 1.5°C above pre-industrial levels in the next few years creates interconnected mitigation and adaptation challenges that must be addressed jointly for climate resilient development across three response phases (Figure 1.5).

First, an immediate response phase that reflects the near-term crossing of 1.5°C. On the adaptation side, this requires the urgent implementation of measures to protect poor and vulnerable populations from foreseeable impacts. In parallel, mitigation efforts must focus on the immediate implementation of measures that reduce global GHG emissions and slow the rate of warming.

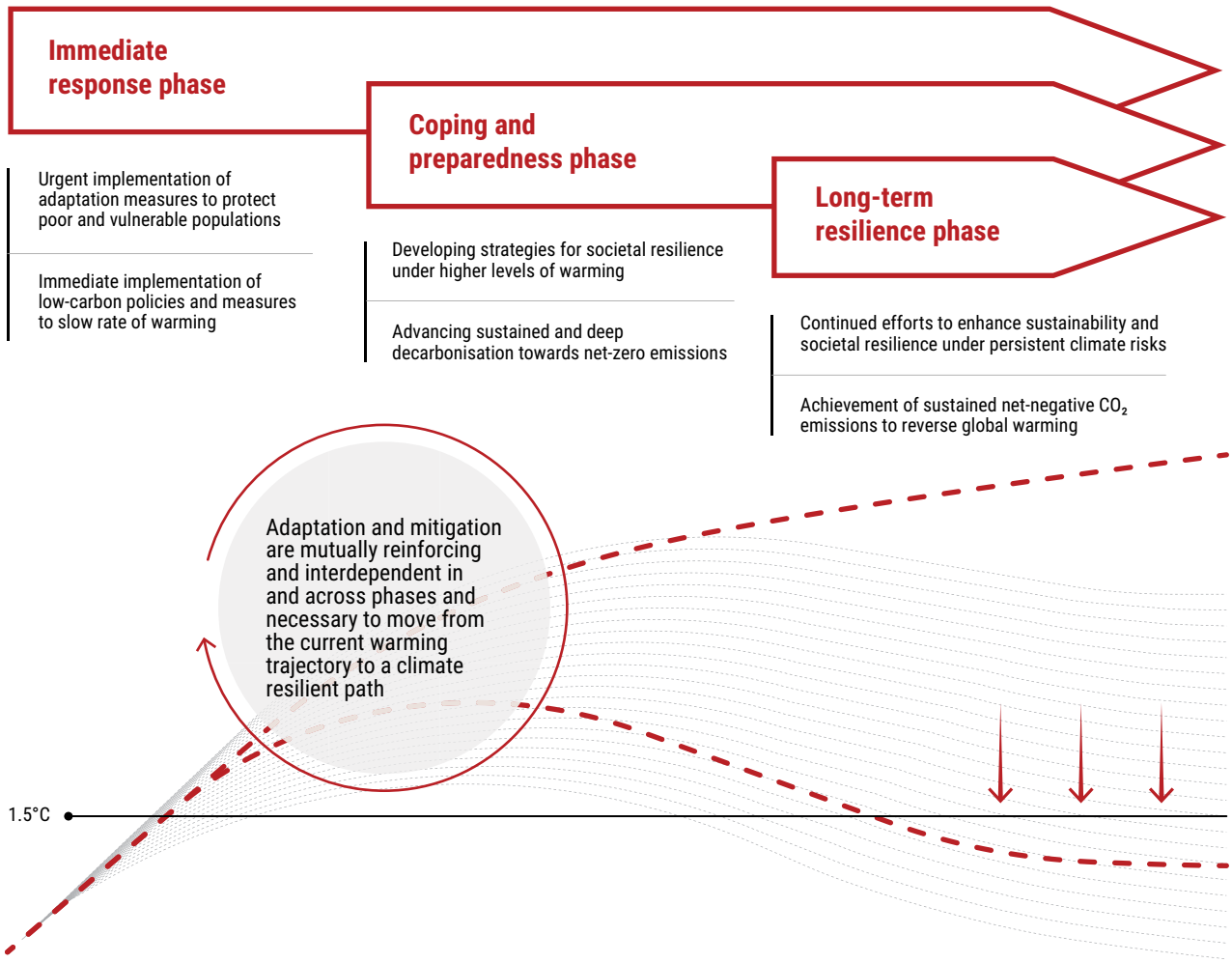
Second, a coping and containment response, **starting immediately**. This requires decision-makers at local and regional levels to plan for a world that has exceeded 1.5°C where warming needs to be halted while communities and societies are protected. This involves strengthening resilience under higher levels of warming, alongside sustained and deep decarbonisation towards net-zero emissions. This phase persists until global warming stabilizes.

Third, a long-term resilience response phase combining warming reversal with continued adaptation. This includes sustained net-negative CO_2 emissions to reduce climate hazards, with continued efforts to close any remaining adaptation gaps and enhance sustainability and societal resilience.

Across these phases, adaptation and mitigation are mutually reinforcing and interdependent. Mitigation strategies must be robust to climate impacts that cannot be ruled out, while adaptation planning must consider how much warming could still occur. Greater confidence in mitigation enables more targeted adaptation. Conversely, insufficient mitigation will push adaptation closer to its limits across regions and systems.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 39

Figure 1.5: Crossing 1.5°C means adaptation and mitigation must move together as they represent mutually supporting pillars of resilient future societies



*Note: Visual features are illustrative and not an accurate representation of global warming magnitudes and rates.

Above 1.5°C, unprecedented change becomes the new normal. Even if global warming declines over the longer term, there will be no return to the previous climatic or societal conditions. The future is therefore not a stable end point, but an evolving reality shaped by intensifying extremes, adaptation limits, ecosystem loss and unfamiliar regional climate dynamics.

Resilience must encompass the capacity to cope, adapt, learn and transform. This places resilience at the centre of the response. Despite its wide use, the concept of resilience carries different meanings across research and practice. In this report, we draw on the IPCC AR6 glossary[9], which refers to resilience as the capacity of social and ecological systems—and their interactions—to cope with disturbances while retaining essential functions, and to adapt, learn or transform.

9 Working group II of the IPCC AR6 also includes a chapter on climate resilient development, which describes a process of implementing mitigation and adaptation to support sustainable development for all. Numerous other perspectives of resilience have likewise been put forward in the literature.

Resilience must be considered against a new normal of persistent change. The challenge is not only resilience to discrete shocks, but also the capacity to navigate persistent, evolving and systemic change. How societies respond will shape development pathways, capacities to cope and adapt, and the forms of resilience that emerge. These may be equitable and enabling, or may reinforce exclusion and entrench vulnerability.


© Dmitrii Marchenko / Vecteezy

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 42

02 Overshoot risks and impacts: Implications on human and environmental systems

Overshoot will create evolving and interconnected risks. This chapter examines the implications of an overshoot, peak and decline pathway for people, biodiversity, development and the planet, and assesses cascading risks across systems and regions. It examines how climate risks evolve across the different stages, with particular attention to cascading impacts across sectors and regions, the role of peak warming and duration of exceedance in determining risk, and the extent to which impacts may be reversible as global temperatures decline (Reisinger *et al.* 2025; Meyer and Trisos 2023). While some impacts may diminish during a decline stage, others are expected to persist for decades, centuries or longer. The extent to which these consequences are reversible in a decline stage is a question only partially answered by existing science literature and will vary substantially among sectors. Understanding these differences is critical for informing mitigation, adaptation and long-term risk management.

2.1 Framing risk, impacts and implications

Complex risks arise from interacting climatic, ecological and socioeconomic pressures. Complex risks emerge from multiple climate and non-climate risk drivers interacting with compound climate hazards and processes leading to cascading socio-ecological impacts and risks (Simpson *et al.* 2025). As the magnitude of exceedance increases, these interactions become more complex and increasingly difficult to manage, threatening human life, ecosystem functions and basic needs of billions of people (IPCC 2022d; Wunderling *et al.* 2023; Reisinger *et al.* 2025). If warming levels are reduced, some impacts are expected to be long-lived and only partially reversible (Reisinger *et al.* 2025), while other impacts would be reduced in the decline stage.

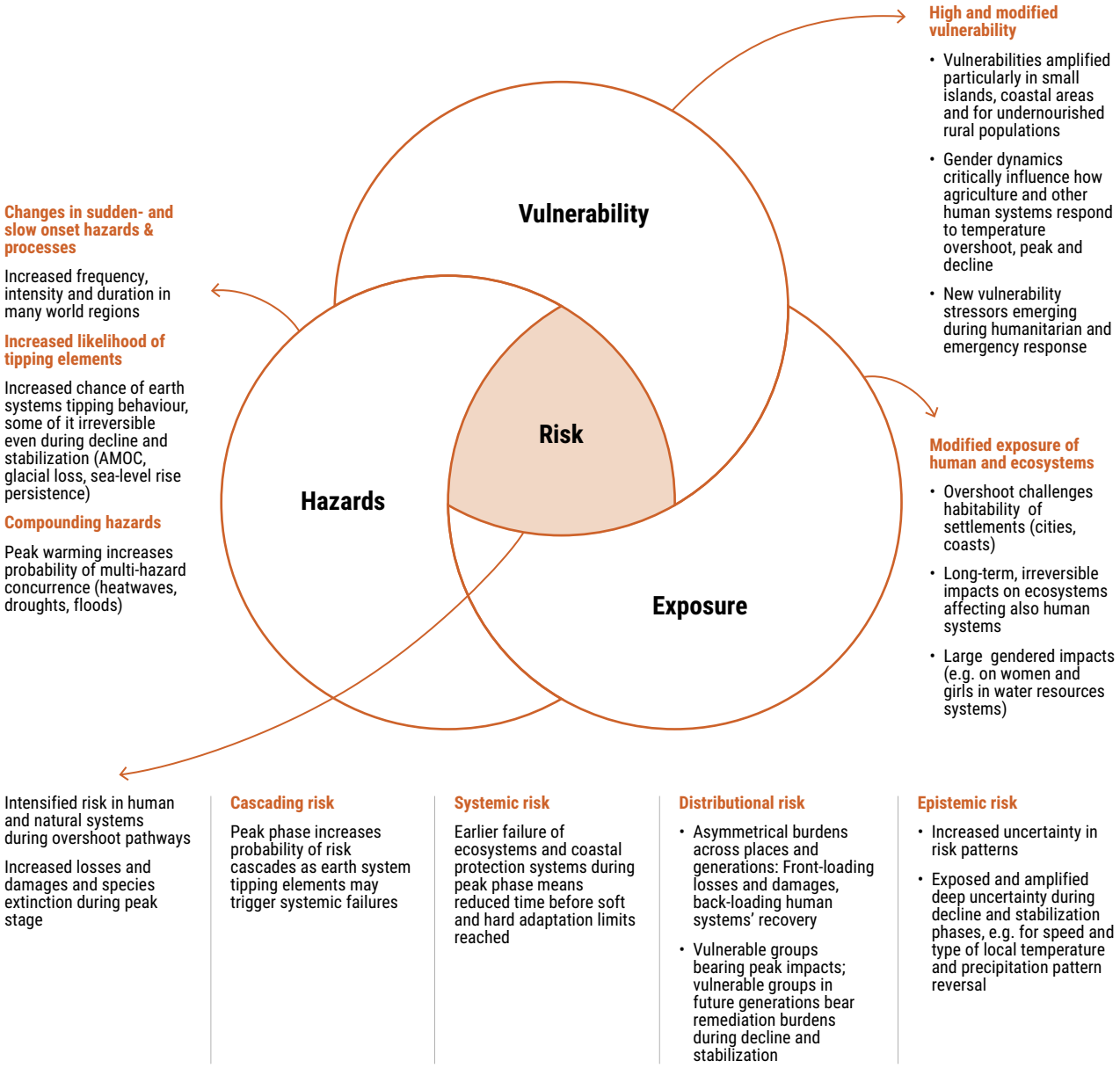
The decline stage will bring new and diverse risks. These impacts will differ in their timing, persistence and degree of reversibility, creating interactions that may not yet be fully anticipated (as outlined in Section 1.5). Interactions between adaptation and mitigation responses in overshoot, peak and decline pathways can be substantial, as large-scale mitigation efforts may create additional pressures on land, water and ecosystems, thereby posing new challenges for adaptation. Specific mitigation strategies may contribute to these interactions, depending on their scale and mode of deployment.

Risks and impacts are neither linear nor fully known across all stages. Overshoot, peak and decline exacerbates a number of climate risks and impacts through complex interactions of hazard, exposure and vulnerability. The subsequent autonomous responses as well as deliberate efforts to reverse warming will create additional challenges, although such challenges would be counterbalanced by the benefits of reducing warming levels (Figure 2.1). Unfortunately, there is limited scientific literature at this stage that explicitly evaluates the benefits of such reductions.



Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 43

Figure 2.1: Risk propeller highlighting how risk, as determined by hazard, vulnerability and exposure, could evolve throughout an overshoot, peak and decline pathway



Source: Building on Wunderling *et al.* 2023; Ebi *et al.* 2024; Schleussner *et al.* 2024; Alcántara-Ayala 2025; Kruczkiewicz *et al.* 2025; Reisinger *et al.* 2025

Shifting dynamics and lags between impact and response worsen uncertainty. There is solid and increasing evidence of physical tipping points and feedbacks that risk triggering self-reinforcing irreversible changes and limits to reversibility in ecological systems as well as limits for adaptation in social systems (Lenton *et al.* 2025). Avoiding high-end climate risks and tipping points may only be possible in low-temperature overshoot (Wunderling *et al.* 2023) of relatively short duration (Ritchie *et al.* 2021). Tipping points in human and environmental systems can generate irreversible effects across systems. There are lasting effects of human responses: for example, some locations might become more or less uninsurable, or even uninhabitable (Vanos *et al.* 2023; Chen and Lin 2024; Spencer *et al.* 2024). In addition, negative social tipping points—framed as limits

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 44

to adaptation (Klein *et al.* 2014)—are increasingly being transgressed in an overshoot world (Theokritoff *et al.* 2026).

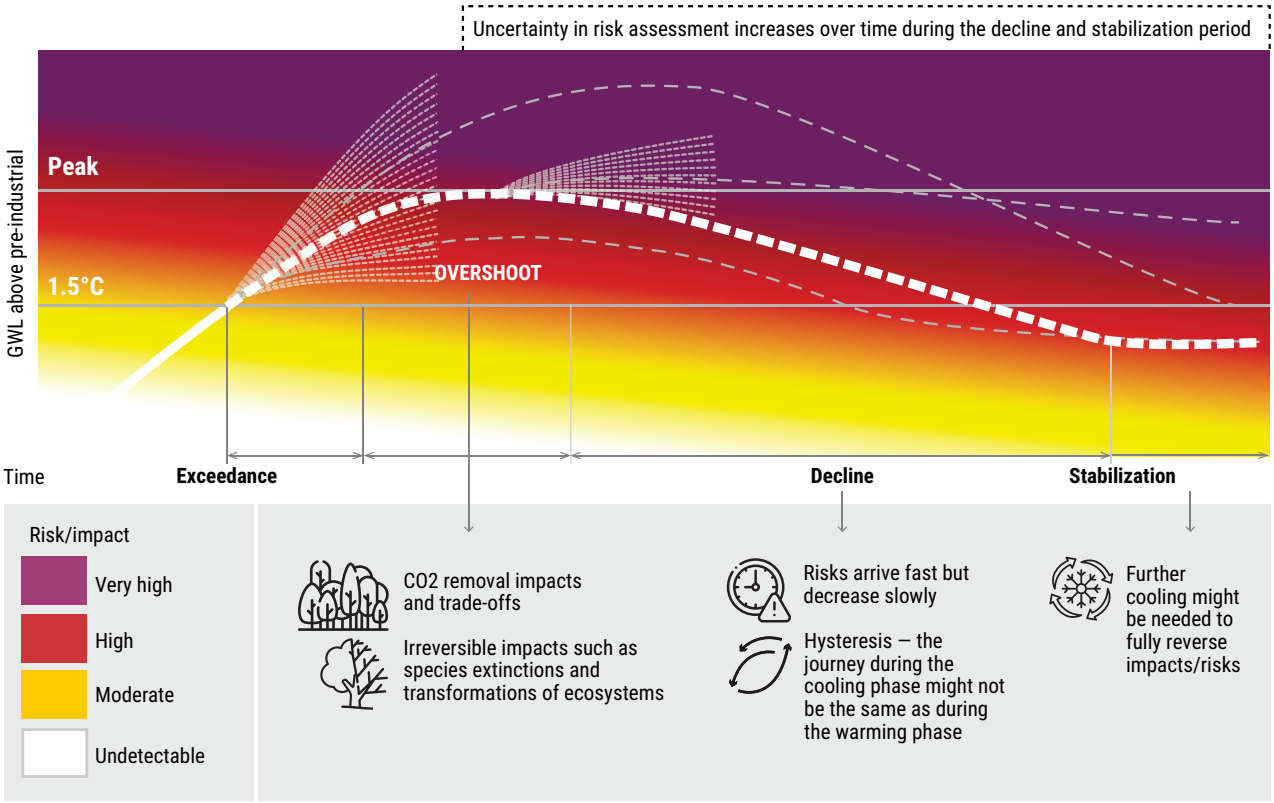
Interconnected risks have to be managed. When pursuing an overshoot, peak and decline pathway, the world will have to manage increasingly interconnected risks, with impacts on one sector having ripple effects across and within other sectors (Ebi *et al.* 2024). Discrepancies in timescales of reversibility require particular attention, as physical and social systems would respond to both warming and cooling trajectories at different rates, potentially creating adaptive mismatches. Reversing adaptations to habitability changes could occur on a different timescale than temperature declines (to the extent that either is possible). These dynamics intensify interactions among climate change, ecological disruption and socio-economic vulnerability.

Risks to nature cascade across food, water, health, energy and livelihoods systems. Human well-being fundamentally depends on biodiversity and ecosystem services — such as water regulation, pollination, soil fertility, coastal protection and disease control (IPBES 2024a). These risks are gender-differentiated as norms shape exposure, access to resources, decision-making power and the ability to act on early warnings. Women and girls, especially in low-income and rural contexts, are disproportionately affected by food insecurity, water scarcity and loss of livelihoods. Climate change is already contributing to biodiversity loss under current levels of warming (IPCC 2023a), and exceedance increases the likelihood of crossing ecological thresholds and tipping points, such as large-scale forest die-back, destabilization of ocean and cryosphere systems (Meyer and Trisos 2023; Dodds *et al.* 2024), and the contraction of climate refugia for species (Smith *et al.* 2018). Climate change also exposes natural and human systems to peak levels of warming and associated extremes that exceed historical experience, while creating persistent legacy impacts due to ecological lags, hysteresis and irreversible changes in ecosystems and socioeconomic structures (Meyer and Trisos 2023; Morée *et al.* 2025).

Comprehensive planning is essential. The temporal dimensions and lags between impacts rippling across sectors and environments are also important to consider when planning for both current worlds and those experiencing overshoot. Some recovery may be possible following peak warming, but it will often be protracted and incomplete, with some ecosystems unable to return to pre-overshoot conditions even after temperatures decline (Figure 2.2) (Meyer *et al.* 2022; Meyer and Trisos 2023). Long recovery times may intensify human and social risks, with consequences for food security, health, displacement and humanitarian logistics that evolve before, during and after peak warming (Kruczkiewicz *et al.* 2025). This increases the probability that limits to adaptation may also be exceeded, which weakens many nature-based solutions and exacerbates inequities where dependence on ecosystem services is high or adaptive capacity is low (IPCC 2023a; Kruczkiewicz *et al.* 2025). For example, initial assessments of risks to food systems, water security, health and migration from ecosystem decline have shown to be disproportionally greater in low-income regions under temporary temperature overshoot (Dodds *et al.* 2024).

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 45

Figure 2.2: Potential impacts during exceedance, peak, decline and ultimately a stabilization period will be path-dependent, likely with higher impacts for a given Global Mean Surface Temperature (GMST) level in the decline stage than in the exceedance stage.



Location of risk colours in this figure are conceptual and not a result of assessment.

2.2 Nature, ecosystems and biodiversity

Nature's services to humanity are at risk. Overshoot is expected to severely compromise Nature's Contributions to People (NCP), with risks increasing as warming rises and persists. NCP—in terms of material and non-material benefits, and regulating functions (Diaz *et al.* 2018)—are expected to be severely compromised depending on the magnitude and duration of the overshoot; with multi-sector risk exposure projected to double for global warming levels between 1.5°C and 2°C and to double again in the case of warming levels between 2°C and 3°C (Byers *et al.* 2018; IPCC 2022c). Irreversible consequences include spatial patterns of temperature and precipitation changes that persist even in a stabilization stage, loss of polar and alpine glaciers, persistent sea-level rise, and significant shifts in the distribution and composition of biodiversity around the world.

Regional differences will evolve and emerge. Overshoot will affect temperatures and precipitation differently across regions, shaping where its impacts are greatest. Spatial patterns of temperature and precipitation changes in overshoot relative to non-overshoot conditions are essential to understanding differences in impacts. During the peak stage, surface temperatures are particularly elevated in the northern latitudes, relative to the rest of the globe (Smith *et al.* 2025). In the decline stage and following stabilization of the Global Mean Surface Temperature (GMST), spatial patterns of differences in temperature and precipitation patterns persist. There are fairly large discrepancies among Earth System Models (ESM) about the persistence of precipitation and temperature changes in a stabilization period. However, there is agreement that average air temperatures in much of the Northern Hemisphere are substantially cooler in the decline stage of an overshoot pathway than in a monotonic warming scenario (where GMST steadily increases over time without any temporary cooling

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 46

period), with warmer temperatures in the southern oceans (Douglas *et al.* 2025). Precipitation patterns are much more uncertain, with disagreement among ESMs on precipitation differences between scenarios with and without overshoot (Douglas *et al.* 2025). This spatial distribution is significant in determining which ecosystems and biophysical components of the Earth system will be most affected throughout an overshoot, peak and decline trajectory.

2.2.1 Low resilience ecosystems

There are irreversible consequences for low-resilience ecosystems. The IPCC AR6 Synthesis Report (IPCC 2023a) concluded, with high confidence, that during a temperature exceedance period, low resilience ecosystems will experience irreversible adverse impacts from excess warming: including polar, mountain and coastal ecosystems impacted by ice sheet melt, glacier melt or by accelerating higher committed sea-level rise (IPCC 2023a). Importantly, it was concluded, with high confidence, that every increment of global warming will intensify multiple and concurrent hazards.

Some ecosystems are inherently vulnerable to minor increases in warming. Low resilience can result from inherent vulnerability of the biological system. Sensitive marine ecosystems—particularly warm water corals—face irreversible shifts during temperature exceedance, even when followed by a decline, with greatest impacts in equatorial regions (Chaudhary *et al.* 2021; Bauer *et al.* 2023). Warm water coral reefs have a warming threshold of 1.2°C (range 0.7–1.5°C) (Pearce-Kelly *et al.* 2025), and coral destruction is already occurring. Although the Fourth Global Coral Bleaching Event (which ran from 2023 to mid-2025) was confirmed by the United States National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and the International Coral Reef Initiative (ICRI) (Reimer *et al.* 2024), warm water corals are now experiencing heat stress on a near-annual basis. Coral regrowth and calcification rates are potentially reduced by 20–40 per cent due to ocean acidification (Bauer *et al.* 2023). There is a low possibility of corals surviving this century under either a scenario of stabilization at 2°C or that of temperature exceedance, overshoot, decline and stabilization at 1.5°C (Hoegh-Guldberg *et al.* 2018; Tachiiri *et al.* 2019), with recovery possible if warming is kept below 2°C (Bozec *et al.* 2025).

Human activities are damaging nature's resilience. The natural resilience of ecosystems can be especially compromised by anthropogenic activities, such as by habitat fragmentation and landscape change (Costello *et al.* 2022). The Amazon forest system, considered as a potential global tipping element (Armstrong McKay *et al.* 2022), is one case where human induced fires and deforestation leading to reduced forest area and fragmentation have resulted in substantial changes to the integrity of the ecosystem, increasing its vulnerability to global warming (Reis *et al.* 2021; Lapola *et al.* 2023; Flores *et al.* 2024; Silva *et al.* 2024; Wunderling *et al.* 2026), with potentially cascading impacts to the regional moisture budget (Silveira *et al.* 2025; Huntingford 2026).

Slow onset risks to ice sheets and coastlines increase over centuries to millennia. Observations, palaeo-records and modelling of the cryosphere's response to warming levels of +1.2°C above pre-industrial, already indicate future Global Mean Sea Levels (GMSL) some metres higher than present (Höning *et al.* 2023; Chandler *et al.* 2025; Stokes *et al.* 2025; Winkelmann *et al.* 2026). Evidence suggests that critical thresholds for long-term ice loss in parts of the Western Antarctic Ice Sheet basins may have been crossed even below +1°C of warming above pre-industrial levels (Reese *et al.* 2023; van den Akker *et al.* 2025; Winkelmann *et al.* 2026), potentially committing these basins to irreversible ice loss over the next two centuries. Marine-based sectors in East Antarctica—representing ~5 m of potential



Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 47

sea-level rise—may also lose stability above 2°C of global warming (Winkelmann *et al.* 2026). Even if the ice sheets do not undergo a transition to a new state, they will likely contribute to several metres of sea-level rise, resulting in inundation of global coastal ecosystems and communities, depending on the warming and cooling rate, and final temperature reached (Bochow *et al.* 2023; Coulon *et al.* 2025; Stokes *et al.* 2025) after an initial overshoot.

Due to relatively nascent scientific literature, assessment of overshoot impacts often requires the integration of the limited overshoot-specific analysis that exists with qualitative, process-based understanding.


© Kenneth Mankoff / Creative Commons

2.2.2 Cryosphere

Ice sheets and other cryosphere ecosystems on the frontline. These ecosystems are already experiencing among the highest magnitudes and rates of climate change impacts in the world. Different components of the cryosphere (such as ice sheets (*see above*), sea ice, glaciers, permafrost and snow) respond differently to a temporary overshoot of 1.5°C, depending on climate sensitivity, response behaviour, thresholds and lag times of the cryospheric system elements, with irreversibility as a potential outcome (Constable *et al.* 2022).

Arctic sea-ice loss is transforming habitats, ecosystems and regional climate dynamics. In the Arctic Ocean, sea ice has thinned and its extent declined (Parkinson and Comiso 2013; Constable *et al.* 2022). A global temperature of 1.5°C results in an extremely warm Arctic (Stroeve *et al.* 2025) and several months of ice-free conditions can be expected every year if warming approaches +3°C by the end of the century (Heuzé and Jahn 2024; Jahn, Holland and Kay 2024; Stroeve *et al.* 2025). Contracting habitats are affecting the range, abundance and viability of polar flora and fauna, both terrestrial and marine, endangering species viability (Constable *et al.* 2022). Warming of the cryospheres, with loss of sea ice (Heuzé and Jahn 2024; Jahn, Holland and Kay 2024; Stroeve *et al.* 2025) results in:

- reduced light reflection (albedo) from the remaining sea ice — reinforcing warming (Wunderling *et al.* 2020; Marcianesi, Aulicino and Wadhams 2021);
- new Arctic shipping routes — with associated ecosystem impacts (Constable *et al.* 2022);
- altered atmospheric flows such as the North Atlantic jet stream — potentially affecting the behaviour of weather extremes (Doblas-Reyes *et al.* 2021; Cvijanovic et al 2025; Hay *et al.* 2025; Jiang, He and Fan 2025);
- altered ocean circulation (Schwinger *et al.* 2022; Zhou *et al.* 2023; An *et al.* 2024);
- cascading impacts on permafrost — potentially releasing stored carbon as CO_2 and methane, potentially exacerbating warming (IPCC 2019); and
- slow and long-term sea-level rise (Fox-Kemper *et al.* 2021; Schleussner *et al.* 2024).

Glacial retreat is one of the most visible impacts of global warming. Under a 1.5°C temperature scenario, global peak glacier extinction rates may be seen as early as 2041 (van Tricht *et al.* 2025). Temperature exceedance, even when followed by a peak and decline in global warming, can drive continued glacier decline for centuries.

Permafrost thaw can trigger persistent, cascading changes even after peak warming. In permafrost systems, feedbacks among energy, water and carbon cycles can yield multiple stable ecosystem states, allowing for persistent effects even after peak warming (de Vrese and Brovkin 2021). Complex processes in permafrost thaw and degradation, regionally and

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 48

locally, affect soil water, carbon content and vegetation productivity (de Vrese and Brovkin 2021; Natali *et al.* 2021; Schuur *et al.* 2022; Schädel *et al.* 2026) among other ecosystem characteristics. These lead to cascading ecosystem impacts, such as through boreal forest dieback, intensification of wildfires and potentially modified ocean circulation (Ritchie *et al.* 2026).

Glacier loss/possible regrowth may change water availability and adaptation needs. Global temperature declines can result in glacier regrowth for many faster-responding alpine glaciers (Schuster *et al.* 2025). In basins where glaciers regrow after peak temperature, glacier runoff reduces further, leading to a peak in runoff followed by 'trough water' (Schuster *et al.* 2025). These non-linear changes in water availability for glacier dependent river basins under a temperature exceedance, peak and decline pathway can have substantial adaptation implications. Cryosphere-related impacts effect ecosystems and downstream communities dependent on seasonal meltwater for their functioning with consequences for water security and long-term adaptation planning (Afzal, Wang and Luo 2025; Cao *et al.* 2025; Hermans *et al.* 2025; Kumar *et al.* 2025; Skiles *et al.* 2018; Velasquez Casallas *et al.* 2025; Xia and Gómez-Baggethun 2026). Temperature decline pathways could be relatively beneficial for seasonal snow, which is sensitive to interannual climate variability and has limited long-term path dependence, but is influenced by broader changes in temperature, precipitation, wildfire, and land cover (Skiles et. al. 2018; Douglas *et al.* 2025; Marshall and Rittger 2025)

Temperature decline could reduce polar ice loss and long-term sea-level-rise. Rapidly declining global temperatures after peak warming could reduce the extent and rate of polar ice loss (Robinson, Calov and Ganopolski 2012; Garbe *et al.* 2020; Bochow *et al.* 2023; Höning, Willeit and Ganopolski 2024) and reduce long term risks of sea-level rise (Schleussner *et al.* 2024).

2.2.3 Biodiversity and forest ecosystems

Sudden risks to biodiversity emerge with exceedance (Meyer *et al.* 2022). Impacts arise from both long-term climate trends as well as intermittent extreme events (heatwave, wildfire, floods, etc.) (Harris *et al.* 2018). Their interaction may significantly shape outcomes, though this remains poorly quantified (Meyer *et al.* 2022; Meyer and Trisos 2023). Marine biodiversity impacts may be more persistent than terrestrial ones due to ocean temperature dynamics, while terrestrial recovery may be constrained by land use change (Meyer *et al.* 2022). Peak biodiversity impacts generally lag peak temperature.

Forest and other ecosystem changes may persist after temperatures decline. There are also risks of irreversible impacts on forest and other ecosystems, such as Amazon forest loss and high-latitude woody encroachment (Munday *et al.* 2025). Existing evidence suggests that committed ecosystem responses in constant temperature scenarios include continued Amazon forest loss (Boulton *et al.* 2017), increased shift toward woody C3 vegetation in Africa (Scheiter *et al.* 2020) and persistent increased boreal forest cover (Pugh



Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 49

et al. 2018). While this work focused on ongoing forest response under constant warming levels rather than temperature overshoot, peak and decline, it nonetheless suggests the potential for long-term hysteresis in ecosystem dynamics even in a temperature decline period.

Species redistribution and mismatch will accelerate. Intensifying climate velocities under overshoot peak and plateau conditions will further accelerate species climate-driven redistribution across terrestrial and marine systems, with direct consequences for adaptation planning and for ecological functioning for example through emerging mismatches between predator and prey distribution and seasonal abundance. By mid-century, more than half of the world's terrestrial protected areas are projected to face significant climate zone shifts (Cui *et al.* 2025), while deep-ocean biodiversity, which is often highly specialized, slow-growing and evolved under millennia of environmentally stable conditions, faces unavoidable escalation in climate velocities even under ambitious mitigation pathways (Brito-Morales *et al.* 2020).

2.2.4 Ocean and coastal biodiversity and ecosystems

Threats to marine ecosystems and communities will increase. Warming oceans, declining oxygen levels and rising acidity from CO_2 absorption make it harder for marine life to survive and weaken ocean ecosystems and habitats (Bijma *et al.* 2013). These changes also threaten food supplies, jobs and the stability of coastal communities around the world.

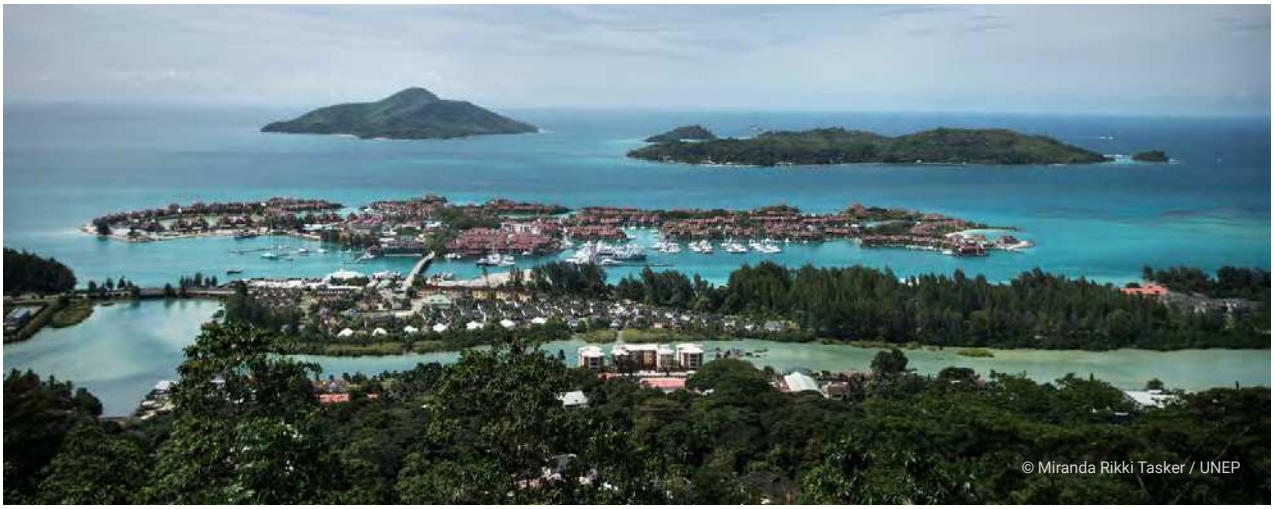
Lasting damage can occur to marine species. Ocean warming and oxygen loss reduce habitable volume for marine species, and this loss can last for centuries and be difficult to reverse (Santana-Falcón *et al.* 2023). Even after global temperatures stabilize, the damage to ocean life continues. The combination of warmer water and less oxygen make it harder for many species—including commercially-important fish species—to survive. In fact, these impacts can be more severe and longer-lasting than during the period when temperatures were still rising, especially in scenarios where warming temporarily exceeds targets before cooling again (Santana-Falcón *et al.* 2023; Morée *et al.* 2025).

Ocean acidification reduces habitable zones, with strong regional variation (Jiang *et al.* 2023; Ma, Gregor and Gruber 2023; Müller and Gruber 2024). In some areas, the vertical habitable zone of marine calcifier species had been reduced by more than 200 m. The Arctic is observed to be acidifying at three to four times the rate of other seas (Qi *et al.* 2022). Critical levels of acidification are reached already in portions of the Arctic and Southern Oceans, impacting the growth of marine calcifiers further beyond, to the north and central Pacific Oceans, and in the Indian Ocean (Findlay *et al.* 2025).

Rising seas occur for centuries. Sea-level rise unfolds over centuries to millennia due to deep ocean warming and delayed cryosphere responses (Park *et al.* 2023). Depending on how much the planet warms, glaciers (excluding the Antarctic and Greenlandic ice sheets) could lose roughly a quarter to over 40 per cent of their mass by 2100, which would raise global sea levels by about 9 cm (+1.5°C scenario), 9.9 cm (+2°C scenario), 12.5 cm (+3°C scenario) and 15.4 cm (+4°C scenario) from glacier melt alone (Rounce *et al.* 2023). Compared to non-overshoot conditions, Schleussner *et al.* (2024) found that every 100 years of exceedance above 1.5°C could lead to an additional median sea-level rise commitment of around 40 cm by 2300. Declining warming would be able to reduce long term risks of sea-level rise.

Sea-level rise threatens ecosystems and communities. Long term sea-level rise will challenge the viability of marginal terrestrial-coastal ecosystems (e.g. mangroves, saltmarsh) with acceleration of coastal erosion, reduced space for ecosystems and alteration of physico-chemical and geomorphic properties of the ocean reclaimed lands. In the decline stage of overshoot sea-level rise would still be occurring, affecting the role of terrestrial-coastal ecosystems as natural coastal protection barriers and fisheries nursery grounds, as well as carbon sinks. Habitat loss from inundation and coastal changes will be greatest in tropical regions, where warming also drives shifts in species distributions (Santana-Falcón *et al.* 2023). Limited space for ecosystems to move inland will constrain adaptation, affecting livelihoods and coastal management.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 50



Different impact timeframes occur at different depths. Some surface-ocean changes may reverse as temperatures decline, while changes throughout the full ocean depth may persist for centuries. There are both encouraging and concerning signs, to be further studied and assessed. In modelled temporary temperature overshoot, peak and decline pathways—with a peak below 2°C—sea surface temperature, pH and dissolved oxygen concentrations in surface sea waters would largely be reversible, but their global averaged ocean values—over the whole water depth—would not, even after centuries (Li *et al.*2020) due to the slow vertical mixing processes. Physical and biogeochemical changes will vary widely across time and space (Tachiiri *et al.* 2019; Bertini and Tjiputra 2022; Holt *et al.* 2025). For an overshoot with higher peak warming (Shared Socioeconomic Pathway [SSP] 5-3.4-OS), many marine communities may never recover, which underscores the importance of limiting peak warming and returning to 1.5°C (Meyer *et al.* 2022) as quickly as possible.

In Focus: Sea-level rise and the small island developing states adaptation challenge

For small island developing states (SIDS) and other low-lying island territories, sea-level rise (SLR) under overshoot is not just a future submergence problem (Vousdoukas *et al.* 2023). Some islands will lose their habitability long before they become completely submerged. This collapse of habitability has already begun. Storm surges are pushing further inland, freshwater lenses and farmland on atoll islands are turning salty, coastal-buffering ecosystems such as coral reefs are being lost, and high-tide flooding now reaches further inland and happens more often than at any time in the historical record (Di Fonzo 2025; Bower *et al.* 2024; Magnan *et al.* 2022). A further five-to-ten centimetres of SLR—expected between roughly 2030 and 2050—is projected to double the frequency of flooding across much of the Indian Ocean and tropical Pacific (IPCC 2022c; IPCC 2023a).

SIDS face an order of risk no comparably exposed coastal geography shares, produced by the convergence of four factors. First, SIDS territories are small, fixed and finite: unlike delta cities or low-lying developed states, which retain higher ground to retreat to, most SIDS have nowhere else to go, which is why populations and infrastructure are concentrated—out of necessity rather than choice—in a narrow coastal fringe. In the Caribbean, an estimated 22 million people live below six metres of elevation, and most Pacific islands have over half their infrastructure within 500 metres of the coast; even higher-elevation islands such as Fiji are exposed, given how much sits near the shore (Mycoo *et al.* 2022). Second, this goes beyond a threat to infrastructure: sea-level rise puts the continuity of statehood itself in question — a question the ICJ addressed directly in its 2025 advisory opinion, affirming that a state does not necessarily lose its statehood through the loss of territory (ICJ 2025). Third, chronic, structural resource scarcity leaves no buffer: since 1970, SIDS have sustained disaster-related Gross Domestic Product (GDP) losses of USD 153 billion against an average GDP of just USD 13.7 billion (WMO 2020), and 70 percent of the 33 SIDS assessed now exceed the critical 40-percent-of-GDP debt-sustainability threshold (GCA 2025). Fourth, narrow and often single-sector economies mean each shock lands harder and recovery draws down the same limited resources needed for the next: Vanuatu was struck by two category-5 cyclones within five years, the second compounding an already-unfolding COVID-19 economic shock, leaving progressively less capacity to withstand what came next (UN DESA 2021). No delta city or low-lying developed state faces this convergence.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 51

Overshoot sharpens each of these vulnerabilities still further, in three specific ways:

First, near-term rise is essentially locked in: how high sea level rises by 2050 is largely independent of whether 1.5°C overshoot occurs — and is locked in even more tightly at the regional level for Pacific atoll States and territories such as Tuvalu, Kiribati and others (NASA Sea Level Change Team 2023; NASA Sea Level Change Team 2024).

Second, the choice of emissions pathway only begins to affect the rate of SLR after mid-century. By that point, atoll freshwater lenses and farmland are projected to be contaminated by saltwater, and port and transport infrastructure in the Caribbean and Pacific is projected to be past key adaptation thresholds (IPCC 2022c). The longer-term benefits of returning to 1.5°C come too late to save what has already been lost (Lee *et al.* 2023b).

Third, SLR will continue for centuries to millennia even after temperatures return to 1.5°C; the depth and duration of overshoot shape by how much, with deeper or longer overshoots risking ice-sheet threshold crossings that lock in additional rise (NASA Sea Level Change Team 2023; NASA Sea Level Change Team 2024). Indian Ocean SIDS face this trajectory with the thinnest evidence base, exemplifying a broader SIDS data-scarcity problem that the ICJ (2025) and International Tribunal for the Law of the Sea (ITLOS) (2024) have held does not diminish states' due-diligence obligations.

Cascading impacts are compounding (UNEP 2024c). As coasts become progressively less inhabitable, displacement is shifting from a distant prospect to a present reality. Yet Pacific Islanders have explicitly rejected the framing of 'climate refugees', and both Pacific and Caribbean SIDS communities have consistently expressed a preference to remain in place, with relocation viewed only as a last resort (IPCC 2022c). Where movement does occur, the IPCC finds with high agreement that the degree of agency and choice individuals retain over if, where, how and when they move is a key determinant of whether mobility leads to positive adaptation outcomes or becomes an additional layer of climate-related impact.

Despite this, empirical research involving UNFCCC negotiators from Pacific and Caribbean SIDS indicates that consultation remains very limited in practice, including with populations whose movement is being planned (Thomas and Benjamin 2018; Nalau and Handmer 2018; Bhatti 2025).

The adaptation toolkit underpinning these choices is itself eroding: ecosystem-based protection, freshwater management and early warning can buy time in the near term, and international law requires their pursuit under stringent due diligence (ICJ 2025). But Ecosystem-based Adaptation (EbA) faces significant constraints above relative SLR rates of roughly 5–7 mm/year, expected within decades (IPCC 2023a; Saintilan *et al.* 2023); and seawalls are costly, maladaptive and merely shift erosion laterally (IPCC 2022c).

This unvirtuous cycle of climate-induced erosion of development and resilience, already documented by the IPCC across many SIDS, will accelerate as overshoot deepens—and by peak warming, the IPCC concludes with high confidence that vulnerability in some SIDS may exceed adaptation limits well before 2100—even under low-emission pathways, because the locked-in component of SLR is largely insensitive to near-term mitigation choices.

Strategic questions

Four of many questions demanding urgent discussion, research and strategic action stand out—questions on which the international community will be measured by whether it recognizes, finances and enables the continued sovereignty, agency and survival of States—whose habitability has been altered, detrimentally or existentially, by emissions caused by activities within the jurisdiction or control of other States

1. What adaptation options are realistically available to SIDS, and at what physical, environmental and social thresholds must protection give way to transformation or mobility?

2. If, as the evidence shows, those whose movement is being planned are rarely consulted, then whose relocation is it? What would it take to shift from mobility planned for SIDS populations to mobility determined by them — across the individual, community and state interests that do not always align?

3. What legal and institutional arrangements are needed to ensure that all States and international organizations continue to respect the sovereignty, state continuity and maritime entitlements of SIDS—and of their increasingly dispersed peoples—as their land territory becomes uninhabitable or submerged — particularly during and after the decline stage, when, despite falling temperatures, sea level will continue to rise?

4. The institutional architecture for adaptation finance and loss and damage is now taking shape — Bridgetown, the Multidimensional Vulnerability Index, the Fund for Responding to Loss and Damage. But it is being built just as the underlying adaptation toolkit erodes. The question is no longer whether these instruments exist; it is whether they can deliver at the scale and speed that locked-in climate impacts demand, or whether they will remain a paper response.

2.3 Impacts on social and human systems

Cascading and potentially irreversible impacts ripple across social and economic systems. Social systems will be affected by temperature overshoot, peak and decline with significant potential for cascading impacts and irreversible changes linked to disruptions in social systems and evolving risk interactions during the decline stage. For example, ecological changes driven by the global warming up and until the overshoot plateau are likely to propagate across sectors: degradation of watershed forests can undermine hydropower generation and drinking water security; declines in pollinator populations can impair food production; and disruption or collapse of coastal ecosystems will increase exposure of people and infrastructure to storm surges and erosion. Many of these impacts are likely to persist even in a decline stage, particularly for small islands and other low-lying coastal areas with high vulnerability (Anderson *et al.* 2020). However, there is currently a lack of detailed

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 52

analysis of how this will play out, particularly in economic and social dimensions (See Box 2: Debt, insurance, and fiscal capacity; and In Focus: Economic impacts and distributional risks under overshoot). Impacts will occur in systems including agriculture and food security, water availability, human settlements and infrastructure, health and livelihoods with broad-ranging consequences for human well-being.

There is a major gap in the understanding of how cultural and social constructs/norms may evolve before and after peak warming, including human relationships and risk perception, particularly in relation to extreme hazards (which may change/increase in frequency for certain areas) and their associated impacts. However, there is limited analysis comparing the challenges associated with the return stage relative to those that would be expected with continued warming.

Reversible changes will require societies to adjust repeatedly. Reversible climate effects will have their own unique challenges for human systems as adaptation to warming will occur over decades, and any subsequent transition to cooler conditions would require a further period of adjustment and readaptation over similarly long timescales. For example, health impacts may arise from changes in the distribution and change of vector-related diseases during a cooling stage. Agricultural practices that have adapted to warmer conditions may have to change again, potentially impacting yields and food security. Such transitions may not be smooth, or easy, as some risks and impacts may decline with temperature but changes may not be immediate or linear, and there is a high level of uncertainty about climate responses to climate at regional or local scales.

Socioeconomic inequity shapes vulnerability. Socioeconomic conditions will continue to shape exposure, vulnerability and response capability, often amplifying climate-related risks. Interactions between climate and socioeconomic variability increase uncertainty, complicating projections of impacts. Without deeper assessment, policy and humanitarian responses risk overlooking the most vulnerable (Kruczkiewicz *et al.* 2025).

2.3.1 Agricultural land, crop yields and land-use implications

Agricultural productivity and food security under threat. The effects of climate change on agriculture will drive significant productivity losses and threaten the food security and livelihoods of billions of people (FAO 2023a; FAO and WMO 2026). Projections indicate potential declines of up to 14 per cent in global food production by 2050 in the absence of effective adaptation measures (Farah *et al.* 2025). Extreme heat is a serious and acute hazard for agriculture, with impacts across crops, livestock, fisheries and aquaculture, and forestry (FAO and WMO 2026). Future crop yields will be shaped both by climate change and by direct biophysical effects of rising emissions, such as CO_2 fertilization. Modelling shows that 0.5°C of warming reduces crop productivity across most regions (Schleussner *et al.* 2018). Reshaping and redesigning for a more climate-friendly global food production system could be essential to achieve sustainable food security (Li, Roy and Dong 2022; Islam and Fraser 2026).

Agricultural land systems may face heightened and persistent risks. Pathways that involve a temporary temperature exceedance while aiming to return global warming to 1.5°C are associated with heightened and potentially persistent risks for agricultural land systems. Rapid mitigation efforts required in these pathways may increase input costs such as fertilizer and energy, leading to yield reductions even without severe climate impacts


© Ratchapon Supprasert / Vecteezy

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 53



(Liu *et al.* 2025). These effects highlight the importance of considering agriculture within the broader mitigation context.

Human health is at risk. Climate-related changes in food availability and diet quality are estimated to increase nutrition-related diseases and the number of undernourished people, affecting tens (under low vulnerability and low warming) to hundreds of millions of people (under high vulnerability and high warming), particularly among low-income households in low- and middle-income countries in sub-Saharan Africa, South Asia and Central America (IPCC 2023a).

Competition for land poses challenges. Unless adequately governed, competition between food production and land-intensive CDR could create additional food-security risks. Where land availability is constrained, competition between food production and CDR can limit the feasibility of land-intensive mitigation strategies (Chapter 3). Food security risks are closely intertwined with land-use constraints and mitigation design, requiring integrated strategies that align climate objectives with agricultural productivity and prioritize low-land-footprint mitigation and CDR options (Liu *et al.* 2025).

Different functions, different power, different vulnerabilities. Gender dynamics also critically influence how agriculture and other human systems respond to temperature overshoot, peak and decline. Women farmers, who constitute more than 40 per cent of the agricultural labour force in low- and middle-income countries (WAF 2025), face structural barriers to land, credit, technology and climate information (FAO 2023b). These constraints increase their vulnerability to climate shocks and limit their ability to benefit from mitigation or CDR-related shifts in land use (Chapter 3).

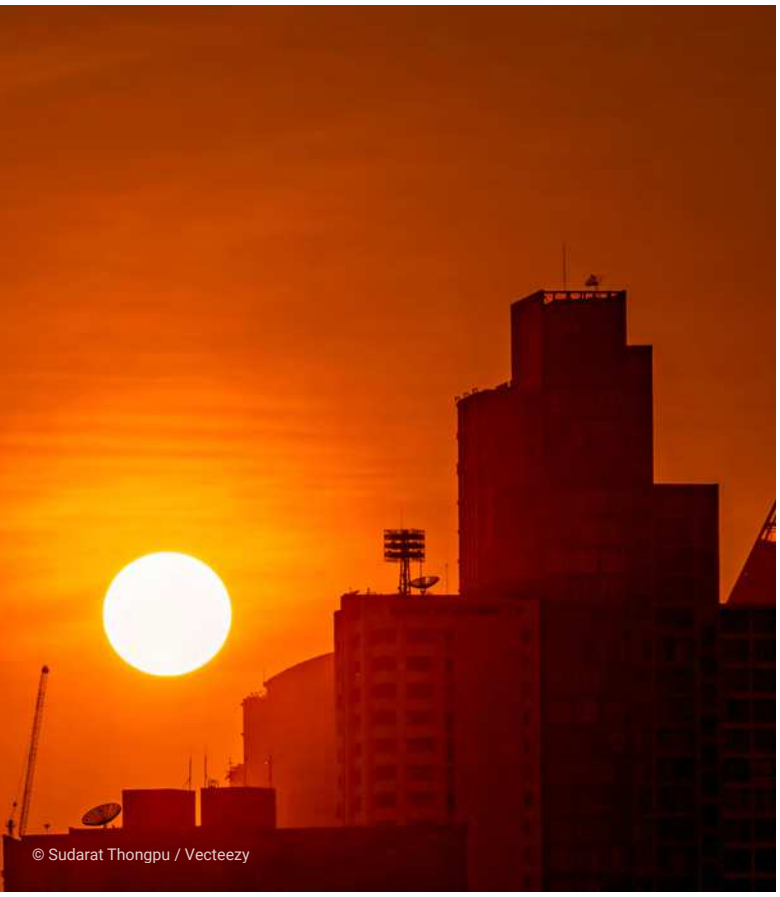
2.3.2 Water resources

Complex, regional and potentially irreversible water impacts are expected. Temperature overshoot, peak and decline will affect water supplies in complex and partially irreversible ways with hysteresis in hydrological systems arising from changes in weather patterns, water flows and how people use and manage water (Walton and Huntingford 2024; Marshall, Grubert and Warix 2025; Steinert *et al.* 2025). While precipitation hysteresis is limited, regional variability—particularly related to Inter-Tropical Convergence Zone (ITCZ)[10] shifts—could yield substantial differences in water availability (Steinert *et al.* 2025). These global-scale simulations do not likely capture the full suite of conditions that could affect

10 This is where northeast winds from the Northern Hemisphere converge with the southeast winds from the Southern Hemisphere. The ITCZ appears as a band of clouds consisting of showers and occasional thunderstorms that encircles the globe near the equator.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 54

hydrologic outcomes throughout the overshoot, peak, decline and stabilization periods, and these discrepancies are particularly understudied in decline periods (Marshall, Grubert and Warix 2025). Long-lasting impacts to forest ecosystems as described above, or land cover and land


© Sudarat Thongpu / Vecteezy

use changes more broadly, in peak warming periods could affect water and energy balance dynamics in ways that reflect the broader impacts of forest conditions and land cover on water quantity and quality (Goeking and Tarboton 2020). For example, enhanced fire risk during a peak period could affect water quantity and quality for years (Williams *et al.* 2022) and yield earlier successional forests that further alter water availability. Conversely, to the extent that a decline period would reduce forest disturbance frequency relative to baseline policies, disturbance influences on water could theoretically be reduced. Overshoot impacts on alpine glacier change and permafrost would similarly propagate through water resources systems (de Vrese and Bovkin 2021; Schuster *et al.* 2025).

Human interactions change the hydro-dynamics. Some of the biggest effects may come from how people interact with water systems. These impacts are not equal — women and girls often carry the responsibility for collecting and managing water and providing care. This can increase their exposure to water shortages, time poverty and health risks during overshoot conditions. Because of this, water governance should include women in planning and decision-making to ensure fair and effective solutions.

Infrastructure built during overshoot may shape risks after decline. Water infrastructure can last for decades, so systems built during a temporary warming period may continue affecting communities and ecosystems long after (Medeiros and Sivapalan 2020). Energy systems in a temporary temperature overshoot—both during warming and later cooling—can also impact water availability, since water is needed for energy production (Grubert and Marshall 2022) and for removing CO_2 (Fuhrman *et al.* 2023). For example, droughts can increase reliance on fossil fuels due to reduced hydropower generation and increased cooling demands (Kern, Su and Hill 2020); this suggests a reinforcing feedback that could make it more difficult to achieve net-negative emissions unless decarbonization pathways are carefully constructed to achieve resilience to hydroclimate variability (Marshall and Upadhyay 2024; Li *et al.* 2025a). These interconnected effects—long-term adaptation to warmer climates, water use in clean energy systems and lasting changes to the water cycle—have not been fully studied, but they are likely crucial for managing water resources under temperature overshoot, peak and decline conditions.

2.3.3 Human settlements, infrastructure and cities

There will be higher risk in cities, especially low-income and informal settlements. Climate impacts have severe consequences for urban communities, particularly in low- and middle-income countries and in low-income and informal settlements, with serious impacts on human health and livelihoods (Lee *et al.* 2023b). Urban populations are large and growing, with the latest World Urbanization Prospects indicating that 45 per cent of the world's population live in cities and a further 36 per cent in towns (UN 2025). By the end of the century, 84 per

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 55

cent of the projected global population will live in urban areas, emphasizing the critical concern of impacts and risks for urban systems. Overshoot intensifies urban impacts, including longer and more frequent heat waves, skyrocketing energy demand and consumer costs, and shifting risk for insect-borne diseases, with residents of both low-income cities and lowest-income areas of wealthier cities, hardest hit, and severe consequences to cities' economies, infrastructure and public health systems (Wong and Mackres 2024). Uncertainty in risk patterns increases, requiring flexible and adaptive decision-making (Dodman *et al.* 2022).

Impacts are highly unequal. Informal settlements—home to around one billion people—face disproportionate risks due to inadequate infrastructure (Satterthwaite *et al.* 2020). Basic service deficits remain widespread, with more than 2 billion people lacking safe water and 3.5 billion without safely managed sanitation (WHO and UNICEF 2025). A temporary temperature overshoot is likely to worsen flooding risks, and make meeting safely managed targets for drinking water and sanitation even more difficult (Dodds *et al.* 2024). Climate change related threats may also overlap, be compounded or cascade through feedback between impacts on infrastructure and at-risk populations (IPCC 2012; Raymond *et al.* 2020a). Exposure to dangerous heat in urban regions and settlements is already a significant health and development problem affecting labour productivity and local economies (Burke, Hsiang and Miguel 2015; Day *et al.* 2019) as well as increasing morbidity and mortality (Matthews, Wilby and Murphy 2017; Nazarian *et al.* 2022; Matthews *et al.* 2025).

Urban development under threat. Overshoot of 1.5°C will undermine urban development gains and objectives, exacerbating risks to infrastructure especially for low-lying coastal settlements which, together with small island contexts, are projected to be home to approximately one billion people by mid-century (IPCC 2023a). For urban areas, this translates into heightened exposure to climate extremes and cascading secondary effects. For instance, relative to a 1.5°C pathway, a 3°C warming scenario could result in significantly prolonged heatwaves (with an average increase in duration of 28 per cent), a higher annual frequency of heatwave events (25 per cent increase), greater cooling energy demand and an expanded number of days conducive to arbovirus transmission (Wong and Mackres 2024). The combined result of the local-scale urban heat island effect, with increased mean and extreme temperatures from a larger-scale climate change is projected to exacerbate overheating in cities globally, with negative impacts on people's health, comfort and productivity and associated urban systems (Nazarian *et al.* 2022). Nature-based solutions such as urban forests may themselves be at risk, as by 2050 76 per cent of tree species in urban areas will be at risk from projected changes in mean annual temperature and annual precipitation with 1.8°C warming (Esperon-Rodriguez *et al.* 2022), thus hampering the potential for this type of nature-based solution at the time when it is most required.

The co-benefits of decarbonisation: cleaner air and better health. A study examining the influence of different economic growth patterns, energy transitions and non-CO_2 mitigation strategies found that most pollutant emissions show a marked reduction under all scenarios, with Sulphur Dioxide (SO_2) and Nitrogen Oxide (NOx) decreasing by approximately 60–80 per cent and stabilizing over time (Liu and Wei 2025). Addressing air pollution—both in itself and in association with mitigation—is key to protecting public health, which could be a positive outcome of a period of decline following peaking of temperature. Lower air pollution would be particularly valuable in low-income neighbourhoods, which have the poorest air quality in many cities (Dodds *et al.* 2024).

2.3.4 Public health

Overshoot will intensify existing health risks and create new ones. These include infectious diseases, malnutrition, mental stress and strain on health systems (Climate Overshoot Commission 2023). More frequent and intense heatwaves are expected to increase heat-related illness and deaths by 2050. Indirect impacts—especially food insecurity—may drive malnutrition and diet-related diseases, potentially exceeding direct heat risks.

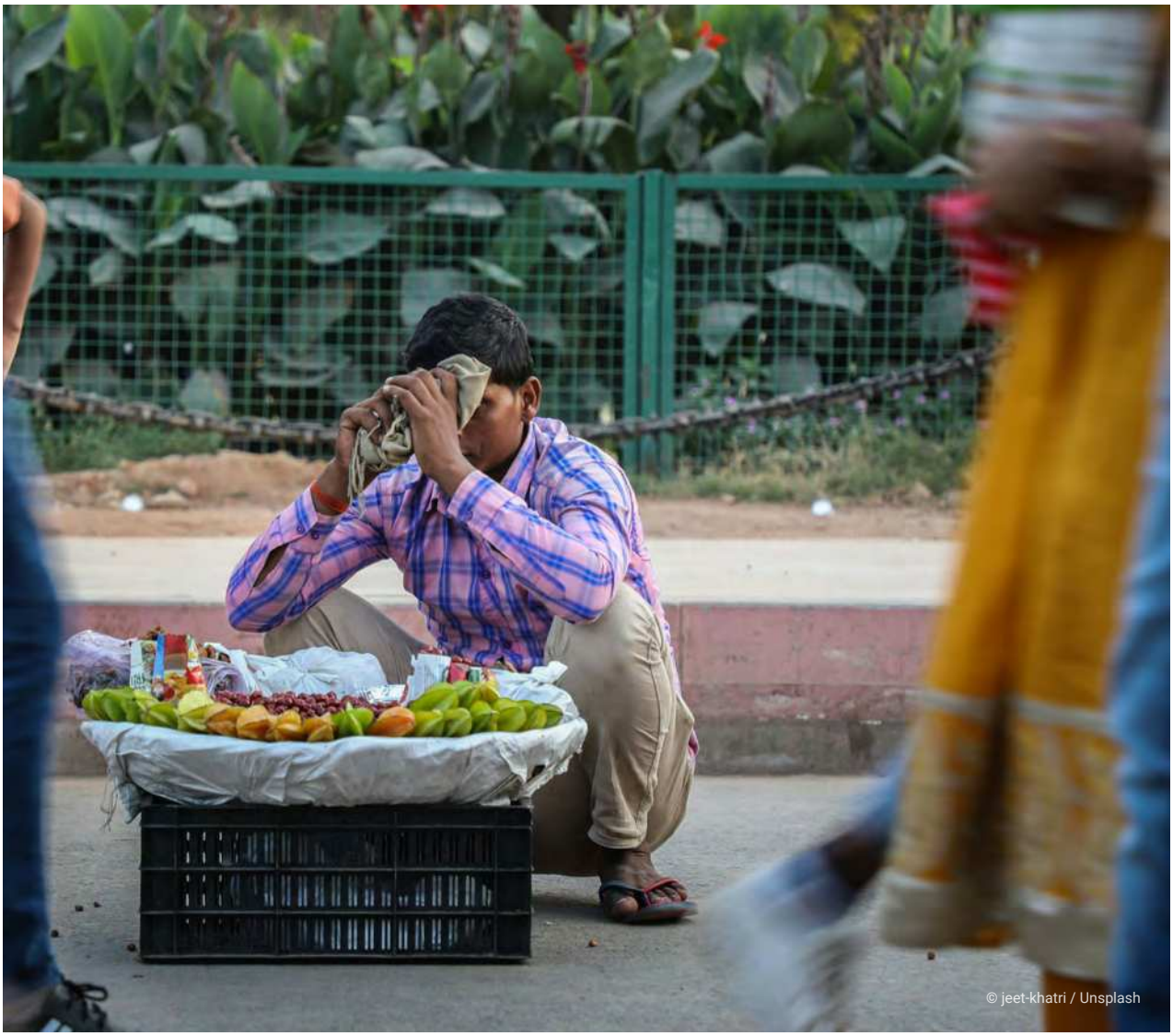
Diseases can shift in range and become more widespread. Rising temperatures will shift vector-borne diseases into higher latitudes while reducing them in

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 56

some endemic areas (Dodds *et al.* 2024). Nonlinear ecosystem changes and shifting species ranges can increase pathogen spillover and expand disease vectors, raising health risks (Pfenning-Butterworth *et al.* 2024).

Heat and humidity threaten workers. This is particularly true for informal workers in low- and middle-income countries (Dodman *et al.* 2023; Sverdlik *et al.* 2024). These risks are experienced differently across and within communities: exposure and access to protection vary according to occupation, working conditions, income, social roles and other intersecting factors, including gender. Adaptation must address occupational risks, unpaid care burdens, mental health and reproductive health needs.

Heat-related mortality can rise sharply. Events expected only once every 100 years in 2000 now occur every 10–20 years under 2020 conditions. As global warming reaches 1.5–2°C, such high-mortality summer seasons are expected to become commonplace without adaptation (Lüthi *et al.* 2023). Warmer regions, including Central and South America, Europe and especially Southeast Asia, are projected to experience substantial escalations in heat-related health burdens, with net increases by the end of the century ranging from 3 per cent in Central America to 12.7 per cent in Southeast Asia under the highest-emission trajectories. However, many of these temperature-driven health impacts could be significantly reduced under pathways that implement strong mitigation measures to limit (Gasparrini *et al.* 2017) or reverse further warming.



Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 57

Post-peak heatwave behaviour remains poorly understood. While temperature reversibility has been studied (Douglas *et al.* 2025) heatwave trends and compound risks—such as heat coinciding with floods—may persist differently across regions. Understanding these dynamics is essential for effective, timely heat-action planning.

2.3.5 Humanitarian responses

New risk hotspots and more complex humanitarian emergencies are expected. As the timing, frequency and geographic distribution of climate-related hazards are expected to shift, impacts will become increasingly compounding and cascading, creating new risk hotspots and increasing uncertainty for humanitarian planning and response. Humanitarian crises may become more complex as multiple hazards interact, existing vulnerabilities are exacerbated and the characteristics of emergencies evolve over time.

Disaster risks are unlikely to reverse as temperatures decline. Some risks will persist while others will emerge or change unevenly, requiring humanitarian systems to adapt to evolving hazard patterns and complicating preparedness, resource allocation and long-term planning in already constrained humanitarian systems (Kruczkiewicz *et al.* 2025). The impacts of overshoot—and the measures taken to limit its magnitude and duration—are also likely to be experienced unevenly. Low-income populations, countries, such as LDCs, and sectors with systemic response capacity constraints, women, and Indigenous Peoples, all communities, groups and individuals are expected to face disproportionate risks, highlighting the importance of ensuring that humanitarian responses remain equitable, inclusive and responsive to the needs of those most affected (IPCC 2022c; Kruczkiewicz *et al.* 2025).

Flexible, multi-level governance is required. To manage risks across all stages of an overshoot, peak and decline pathway rigid and static institutions and governance will no longer suffice. They will need to integrate new knowledge, addresses unequal impacts and places equity and inclusion at the centre of humanitarian and climate action.

Box 2. Debt, insurance and fiscal capacity

Economic frameworks poorly capture how actors weigh risks and preferences across the stages of an overshoot. The fiscal difficulty compounds in a loop and this is illustrated in the climate shocks (See 2.3.5) and stresses (See 2.3.3) that are anticipated. Climate vulnerability raises the cost of sovereign borrowing before any disaster occurs, so vulnerable countries pay more for capital simply for being exposed (Kling *et al.* 2025). When damage then arrives, the borrowing that meets it is contracted at that higher rate. Debt service subsequently crowds out the adaptation and development spending that would have reduced the vulnerability, and ratings can deteriorate further, raising borrowing costs again during the decline, when investment is most needed. Debt sustainability analysis that omits climate impacts understates this by construction (Zenios 2022), and adaptation financed through additional borrowing can worsen debt dynamics even where it improves output (Calcaterra *et al.* 2025).

The pattern is already visible in small island states that borrow heavily to rebuild after successive catastrophic cyclone seasons, with the resulting constraints shaping development for decades. Financial models assume warming that only rises, in project lifetimes, return calculations and risk pricing alike, so a pathway that peaks and returns needs purpose-built analysis (Bolton *et al.* 2020; Schleussner *et al.* 2024).

Similar pressures appear in the private and subnational sectors. Insurers may withdraw from high-risk regions before a peak is reached, shifting costs to governments and households and eroding the property values and tax base that local adaptation depends on (Hemmati *et al.* 2025). Firms may relocate supply chains, and many local and provincial governments continue to treat extreme events as discrete rather than as a sustained shift (Gilmore, Kousky and St. Clair 2022). Deferred decisions, such as upgrading building codes or committing to protective infrastructure, raise long-term risk where fiscal capacity has already been eroded. These pressures are documented for warming in general rather than for overshoot specifically, but they would apply across an overshoot pathway.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 58

In Focus: Economic impacts and distributional risks under overshoot

Rising costs can be softened with adaptation. The available literature does not yet provide a comprehensive assessment of economic and distributional impacts across the full 1.5°C overshoot, peak and decline pathway. Producing comprehensive economic estimates for any temperature scenario is challenging and associated with large uncertainties, arising from, inter alia, complex interactions among physical, natural and social systems; pervasive climate, socioeconomic and system response uncertainties; and the heterogeneous nature of climate impacts that vary across space and time (O'Neill *et al.* 2022, p. 2495). However, the existing literature consistently finds that the costs of climate change increase with higher global warming and that adaptation can substantially lower projected economic impacts although it cannot eliminate all losses and becomes increasingly constrained as warming rises (IPCC 2022c). This is also reflected in the World Bank Group's Country Climate and Development Reports (CCDRs), which examine how countries can pursue development goals while adapting to and mitigating climate change.

Country outcomes can be modelled. Some country findings are summarized below, focusing on labour productivity and health, sectoral productivity, water and infrastructure, and poverty, social protection and adaptation. CCDR scenario architectures vary. The examples below include RCP8.5, SSP5-8.5, dry/hot and wet/warm futures, as well as lower-warming, no-damage and adaptation/resilience comparators. Most modelled results concern the 2040s to 2050s, but some are warming-level, stress-test or end-century estimates. Because RCPs are concentration pathways rather than complete socioeconomic scenarios (van Vuuren *et al.* 2011), the estimates below retain each CCDR's own scenario label and horizon rather than impose a uniform RCP8.5/RCP2.6 comparison. These assessments do not model the full overshoot, peak and decline pathway. They are used here to illustrate economic and distributional impact channels likely to remain relevant during exceedance, rather than to estimate the specific economic costs of overshoot.

Labour productivity and health. Across mid-century adverse-warming scenarios, CCDRs show clear links between extreme heat and reductions in workers' productivity. In Ghana, under RCP8.5, heat stress and heat-related diseases are projected to reduce agricultural labour productivity by about 8.5 per cent by 2050, compared with 2.6 per cent in manufacturing and 0.3 per cent in services (World Bank Group 2022b). A separate warming-level estimate in the same report, not tied to a specific year, suggests that at 3°C above 1990 levels labour capacity could fall by about 11 per cent for manual labourers, versus less than 1 per cent for office workers. This warming level uses the CCDR's 1990 baseline and is not directly comparable with the pre-industrial baseline used for the Paris Agreement temperature goal.

A similar pattern emerges in Sri Lanka: agricultural labour-productivity losses by 2050 are projected at around 6 per cent under a wet/warm future and almost 8 per cent under a dry/hot future, with labour heat stress accounting for roughly 60–70 per cent of modelled GDP losses by 2053 (World Bank Group 2025). In Guinea-Bissau, the dry/hot scenario leads to labour-productivity declines by 2050 of 9.5 per cent in agriculture, 5.5 per cent in industry and 3.6 per cent in services (World Bank Group 2024c). Limited access to ventilation and cooling can further widen inequalities. In Sri Lanka, heat-adaptation costs across Colombo, Jaffna, Point Pedro and Wennappuwa are estimated at USD263 million by 2050, with low-income households in unplanned settlements facing higher barriers to adaptation (World Bank Group 2025).

Sectoral productivity, water and infrastructure impacted The CCDRs stress that sectoral shocks in agriculture, water and fisheries can translate into broader economic losses. In Argentina, a no-action diagnostic that holds water infrastructure and water-use efficiency at current levels estimates that higher temperatures and evapotranspiration could compromise about 25 per cent of current irrigated area, causing roughly USD837 million in annual losses; the CCDR does not link this conditional estimate to a dated RCP/SSP (World Bank Group 2022a). In Ghana, under RCP8.5 warming of about 1.12°C by 2050, crop yields are projected to fall by 1–21 per cent by 2050, depending on the crop, with average food-price increases of about 13 per cent relative to a no-climate-change scenario (World Bank Group 2022b). In Iraq, a modelled 20 per cent reduction in water supply lowers GDP by about 3.5 per cent; adding temperature impacts on crop yields increases the loss to about 3.9 per cent, while a 10–20 per cent rise in food prices could increase poverty by 1.6–4.4 percentage points. These are water and temperature shock scenarios, not dated RCP projections (World Bank Group 2022c). In Pakistan, under a high-growth and high-warming scenario reaching 3°C by 2047, water demand is projected to increase by almost 60 per cent, with warming accounting for up to 15 per cent of the increase. The CCDR also reports crop-yield declines of 14–50 per cent under some climate-change scenarios, without assigning the full range to a single pathway (World Bank Group 2022d). Small Island Developing States (SIDS) are similarly vulnerable: under SSP5-8.5, fisheries export losses in the Maldives are estimated at about USD202.3 million per year, around 3.35 per cent of GDP by end-century (World Bank Group 2024b).

Asset and infrastructure damage cascades through the economy. Under a high-emissions climate future in Sri Lanka, a flood with a 25-year return period is projected to cause 26 per cent more damage by the 2040s than in the 1995–2020 baseline. Separately, diagnostic estimates put annual urban-flood damages above USD160 million and expected combined annual transport-network losses at USD66 million (World Bank Group 2025). In Argentina, modelled annual expected flood asset losses reach up to USD1.4 billion, with associated welfare losses up to USD4 billion; in a mid-range case in which flood frequency doubles, expected asset losses rise by 125 per cent. The CCDR does not tie these estimates to a specific RCP (World Bank Group 2022a). In Ethiopia, under a wet/warm future and the Conventional Generation (CG) scenario, additional road and bridge repair costs reach USD755 million per year in 2041–2050; under the Renewable Energy Sources (RES) scenario, about USD9 billion in proactive adaptation over the same period could avoid up to USD13 billion in road and bridge costs relative to CG (World Bank Group 2024a). The observed 2022 floods in Pakistan provide an event-based illustration rather than a scenario projection: 33 million people were affected, nearly 8 million were displaced, and combined damage and losses exceeded USD30 billion (World Bank Group 2022d).

Poverty and social inequity can worsen. These examples show that macroeconomic risks relevant to overshoot pathways arise from unequally distributed micro-level impacts. In Pakistan, preliminary post-2022-flood estimates suggest that national poverty could rise by 3.7–4.0 percentage points, equivalent to 8.4–9.1 million people, while multidimensional poverty could increase by 5.9 percentage points; these are post-disaster rather than climate-pathway estimates (World Bank Group 2022d). In Ghana, poverty in 2050 is projected to be about 0.8 percentage points higher under RCP4.5 and 1.7 percentage points higher under RCP8.5 than in a no-damages scenario, corresponding to roughly 400,000–900,000 additional people in poverty (World Bank Group 2022b). The Côte d'Ivoire CCDR illustrates

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 59

how climate change alters development trajectories: without climate change, poverty is projected to fall from about 39 per cent in 2020 to 16.7 per cent by 2050; under a dry/hot scenario it would fall only to 23.4 per cent, while adaptation/resilience investments could reduce it to 20.5 per cent, leaving about 1.5 million fewer people below the poverty line than without those investments (World Bank Group 2023a). In Colombia, a severe climate-shock stress test, rather than a specific RCP and horizon, finds that around 45.5 per cent of households in the most affected departments would not be covered by existing social assistance, while around three million poor people would fall deeper into poverty (World Bank Group 2023b).

Adaptation is key to reducing economic harm. The CCDRs emphasize that adaptation is economically material. In Colombia, adaptation investment is conservatively estimated to increase GDP by up to 2 per cent relative to a scenario without adaptation. Expressed in terms of avoided climate damages, by 2050 adaptation reduces the modelled GDP loss by about 1.2 percentage points in the most benign damage scenario and about 2 percentage points in the most extreme scenario, cutting damages by up to 80 per cent but not fully offsetting them (World Bank Group 2023b). In Côte d'Ivoire, adaptation/resilience investments reduce projected poverty in 2050 from 23.4 per cent under the dry/hot scenario to 20.5 per cent (World Bank Group 2023a). Yet, adaptation costs can be high. In the Maldives, sea-level-rise impacts could reduce GDP by almost 11 percentage points by 2050 under a high-emissions scenario, while sustained reconstruction and adaptation could reduce the impact to less than 6 percentage points; financing requirements for adaptation to sea-level rise and flooding alone are estimated at USD2–4 billion (World Bank Group 2024b).


© Reza Shahriar Rahman / UNEP

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 61

03 Limiting overshoot - mitigation pathways

Immediate cuts to greenhouse gases are needed. Rapid and sustained mitigation within this decade is both necessary and feasible across all sectors and GHGs to hold warming well below 2°C and as close to 1.5°C as possible by the end of the century. This requires reaching global net-zero CO_2 emissions in the 2050s, alongside deep reductions in other gases, especially in methane from fossil fuels, agriculture and waste. Continued efforts to tackle sources of residual emissions reduces the reliance on CDR upscaling.[11] CDR will be needed to achieve net zero and net-negative emissions, but its sustainable scale is constrained by risks to biodiversity and food security, and its effectiveness may decline with climate feedbacks that also weaken natural carbon sinks.

Sustained mitigation action is essential. Keeping the possibility of returning warming to 1.5°C by 2100 relies on achieving sustained net-negative CO_2 emissions at global scale in the second half of this century, and potentially further reductions of non-CO_2 emissions. The feasibility of this depends on early and deep mitigation that minimizes reliance on large-scale CDR to counterbalance avoidable residual emissions, while considering the environmental sustainability and social justice implications of CDR deployment. Achieving not only net-zero but sustained net-negative CO_2 emissions requires strong institutions and effective global cooperation and multilateralism that demonstrably supports equitable, regionally differentiated action with high-emitting and high-capacity countries taking the lead. Current national net-zero CO_2 and GHG targets should be understood as a milestone towards a net-negative emissions future rather than the final destination.

Decisions taken now will determine the chances of returning to 1.5°C. Planning to go beyond net-zero is a challenge for the present generation, not future ones, given the time it will take to develop and scale strategies, policies and institutions to support net-negative emissions, and to integrate these into existing policy frameworks. Decisions taken this decade will determine whether viable options remain to gradually reverse warming back to 1.5°C.

3.1 Accelerating mitigation to limit climate related risks

Every increment of warming avoided matters. Chapter 2 demonstrated that every increment of warming not only increases harm, losses and damages caused by climate change, but that warming rises above 1.5°C also constrain some mitigation options. For example, Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF) currently takes up around a quarter of mitigation in Paris-compliant scenarios, yet recent wildfires have weakened land-based carbon sinks, temporarily accelerating the growth rate of atmospheric CO_2 and underscoring the urgency of mitigation. Rapid emissions cuts, complemented by CDR, are therefore essential to limit the magnitude of overshoot and climate-related risks, and enable a return

11 In this report, CDR methods are classified following the terminology of Edwards ***et al.*** (2026) in The State of Carbon Dioxide Removal report. This distinguishes conventional CDR, which comprises methods already practiced that largely rely on enhancing carbon storage in the terrestrial biosphere via ecosystem restoration, afforestation and soil carbon sequestration; and, novel CDR that is typically at lower technology readiness and comprises new technologies such as bioenergy combined with carbon capture and storage (BECCS), Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS), biochar and enhanced weathering. Given their reliance on carbon storage in the terrestrial biosphere, conventional CDR carries higher risks of reversal but can offer co-benefits for biodiversity and livelihoods if implemented under strong sustainability criteria (Smith ***et al.*** 2019b). However, strong sustainability criteria also limit the scale at which conventional CDR can be deployed globally (Deprez ***et al.*** 2024).

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 62

of global warming back to 1.5°C. Given uncertainties in Earth system feedbacks, carbon sinks and CDR effectiveness, a precautionary approach is necessary and best estimates provided in this chapter should be seen as minimum requirements (Section 1.4; Schleussner *et al.* 2024). Developing future CDR portfolios also requires a comprehensive framing in terms of risks and opportunities to support sustainable development objectives.

Limiting the peak and length of overshoot. This chapter outlines two distinct, yet interconnected strategies to achieve a temperature pathway that peaks and returns to 1.5°C: first, limiting the magnitude of the exceedance by reaching net-zero CO_2 as soon as possible and reducing non-CO_2 emissions as much as possible (Section 3.2); and second, limiting the duration of the overshoot and bringing warming back down by achieving net-negative CO_2 emissions and further methane reductions (Section 3.3).

Climate policy must evolve to include removal strategies. While immediate and rapid emission cuts in the short-term are critical to limit the magnitude of overshoot and reduce reliance on future CDR, keeping 1.5°C within reach requires climate policy to evolve to include the removal of already emitted GHGs. This shift will require governance, fiscal and policy frameworks that enable the responsible deployment, monitoring and scaling of CDR, while embedding net-negative emissions objectives in long-term strategies from international to city scales (Fuss *et al.* 2024; Abernethy and Jackson 2024; Edenhofer *et al.* 2025; Ulpiani *et al.* 2026). Furthermore, considerations of equity and justice emphasize critical concepts such as fair technology transfer, and safeguards to prevent CDR strategies from creating disproportionate impacts on land, water security and vulnerable livelihoods, and new concepts such as carbon debt obligations (Deprez *et al.* 2024; Pelz *et al.* 2025a). Within the UNFCCC framework, navigating the shift from net-zero to net-negative emissions will be governed by the principles of common but differentiated responsibilities and respective capabilities (CBDR-RC) and equity, where the credibility of the transition rests on the commitments of front-runner nations (Mohan *et al.* 2021).


© Aboubacar Goube / UNEP

3.2 Stringent near-term mitigation to limit peak warming

Near-term mitigation is critical to limit peak warming, reduce duration of temperature overshoot and avoid reaching adaptation limits (Chapter 4).

Avoiding carbon lock-in in infrastructure is central to this effort. Investments in long-lived, high-emission infrastructure, such as fossil-based power plants, transport systems and industrial facilities, can constrain future emissions reductions and lock countries into high-carbon trajectories (Seto *et al.* 2016; Smith *et al.* 2019a). Existing and planned fossil fuel infrastructure alone could exceed the CO_2 emissions consistent with 1.5°C in 2030 by 120 per cent, and would consume a substantial share of the remaining carbon budget for 2°C (SEI, Climate Analytics and IISD 2025). This underscores the need to avoid new high-carbon assets and accelerate retirement or retrofitting of existing high-emission infrastructure.

Urgent reductions in methane and other short-lived climate pollutants are needed. Significant low-cost abatement options are available especially in the oil and gas sector, but also through reductions of food loss and

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 63

waste, waste segregation and methane capture from landfills. Methane contributes around 0.5°C of current global warming (IPCC 2021; UNEP 2025c) and early reductions can significantly lower peak warming while delivering health co-benefits (McKeough 2022; Smith and Mathison 2024; UNEP 2025c). Early mitigation requires combined supply- and demand- side action. High-leverage measures could deliver up to 41 $GtCO_2e$ annually by 2035 under USD200/tCO_2e, with about half of this potential at costs below USD20/tCO_2e (Figure 3.1). However, these estimates assume action beginning in 2020; given delayed implementation, the achievable potential is likely lower but still necessary.

Accelerating the renewable energy revolution is crucial. On the supply side, limited-overshoot scenarios suggest scaling renewables to 60–70 per cent of global electricity generation by 2030, supported by grid expansion, storage and demand flexibility (Byers *et al.* 2022). This modelled trajectory is broadly consistent with the COP 28 commitment to triple global renewable energy capacity to at least 11,000 GW by 2030 (UNFCCC 2023a; UNFCCC 2023b). Improvements in supply-chain efficiency, fuel switching in heavy industry and deployment of low-carbon heat and transport technologies can lock in long-term emission reductions while avoiding new carbon-intensive infrastructure (Pathak *et al.* 2022).

Reducing demand is an important piece of the puzzle. Significant emissions reductions in end-use sectors are possible by 2050 in some regions. However, durable demand-side change depends on enabling policy, infrastructure and shifts in social norms, rather than relying on individual choice alone (Creutzig *et al.* 2022; Albarracín, Fayaz-Farkhad and Granados 2024). High mitigation potential options available at low costs include energy efficiency improvements, electrification of heating and cooling, and more efficient appliances, as well as behavioural shifts to change urban mobility patterns, including greater use of public transport and micromobility (Jaramillo *et al.* 2022). Dietary shifts could reduce food system emissions by 0.7–8.0 $GtCO_2$-eq yr^{-1} by 2050, while also delivering health and land-use co-benefits (Mbow *et al.* 2019; Rosenzweig *et al.* 2020).

These measures can also deliver substantial co-benefits. Cleaner air, improved public health, lower energy costs, enhanced energy security and greater equity all come with mitigation (Dinh, Tran and Hensher 2024; O'Garra *et al.* 2024; UNEP 2025e). These measures also help moderate peak energy demand, ease pressure on energy systems and enhance resilience, reducing reliance on high-cost supply-side responses. Transitioning away from fossil fuels is thus a key investment in resilience and public welfare (Johnsson, Kjärstad and Rootzén 2019; Langevin *et al.* 2023).

Early emission reductions can reduce reliance on uncertain future CDR strategies. Pathways limiting warming to 1.5°C with limited exceedance[12] typically require global GHG emissions to decline by 55 per cent (from 2019 levels) by 2035, assuming action began in 2020 (UNEP 2025b). As global emissions have continued to rise, the most ambitious pathways incorporating observed emissions up to 2025 now project peak warming of 1.6–1.8°C with 50 per cent probability (UNEP 2025b; Gidden *et al.* 2026a). Pathways with higher peak warming exceedance (up to about 1.8°C) depend on substantially greater cumulative removals—often hundreds of gigatons of cumulative CO_2 removal during the second half of the century—to return to 1.5°C by 2100 (Byers *et al.* 2022; Riahi *et al.* 2022; Ganti *et al.* 2024; Gidden *et al.* 2026a). Yet most CDR strategies remain uncertain in terms of scalability, permanence, durability and social acceptability, with the main sources of uncertainty dependent on the CDR method (Brunner, Hausfather and Knutti 2024; Bindl, Edwards and Cui 2025; Mendez, Creutzig and Fuss 2025).

As the planet warms, the potential of CDR falls. In a warmer future, climate and biogeochemical feedbacks constrain nature's removal and carbon retention capacity. Heat stress, drought, wildfire risk and pest outbreaks can thus reduce carbon uptake and storage in CDR approaches, and increase reversal risks across land- and

12 Warming levels stated in this chapter are generally given with a 50 per cent probability. Limiting warming with higher probability would require more deeper reductions and/or greater removals than those indicated in the text. UNEP (2025a) provides more detailed information on emission reductions to achieve warming with 50 per cent and 66 per cent probability.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 64

ocean-based systems (Boysen *et al.* 2017; Krause *et al.* 2025; Jeltsch-Thömmes *et al.* 2024). For example, blue carbon and marine-based sequestration potential can also be constrained as their carbon storage potential is sensitive to sea-level rise, warming and ecosystem degradation (Sandi *et al.* 2021; Song *et al.* 2025b; Grosselindemann, Burger and Frölicher 2026). These feedbacks underscore the need to protect carbon stocks in natural ecosystems and imply that removal potentials estimated under present-day climate conditions may not be fully realised under higher levels of warming, particularly during and after overshoot periods. In addition, rising temperatures are linked to increased natural methane emissions from wetlands, reinforcing the urgency of reducing human-caused emissions (Shindell *et al.* 2024; Zhang *et al.* 2026).

Higher temperatures can undermine low-carbon energy systems. Climate extremes reduce the performance and reliability of electricity generation, transmission and storage infrastructure, reducing the efficiency of thermal and renewable power systems while increasing maintenance and adaptation costs (Cronin, Anandarajah and Dessens 2018; Perera *et al.* 2020; Yalew *et al.* 2020). Specifically, renewable energy systems are increasingly exposed to climate variability and extremes and become more uncertain (Gernaat *et al.* 2021). Prolonged droughts can sharply reduce hydropower generation, heatwaves lower solar photovoltaic efficiency and altered wind regimes affecting its predictability and raising generation costs (Yalew *et al.* 2020; Cruz *et al.* 2025). These impacts may also constrain energy-intensive CDR technologies, such as direct air carbon capture and storage (DACCS), precisely when large-scale deployment is expected.

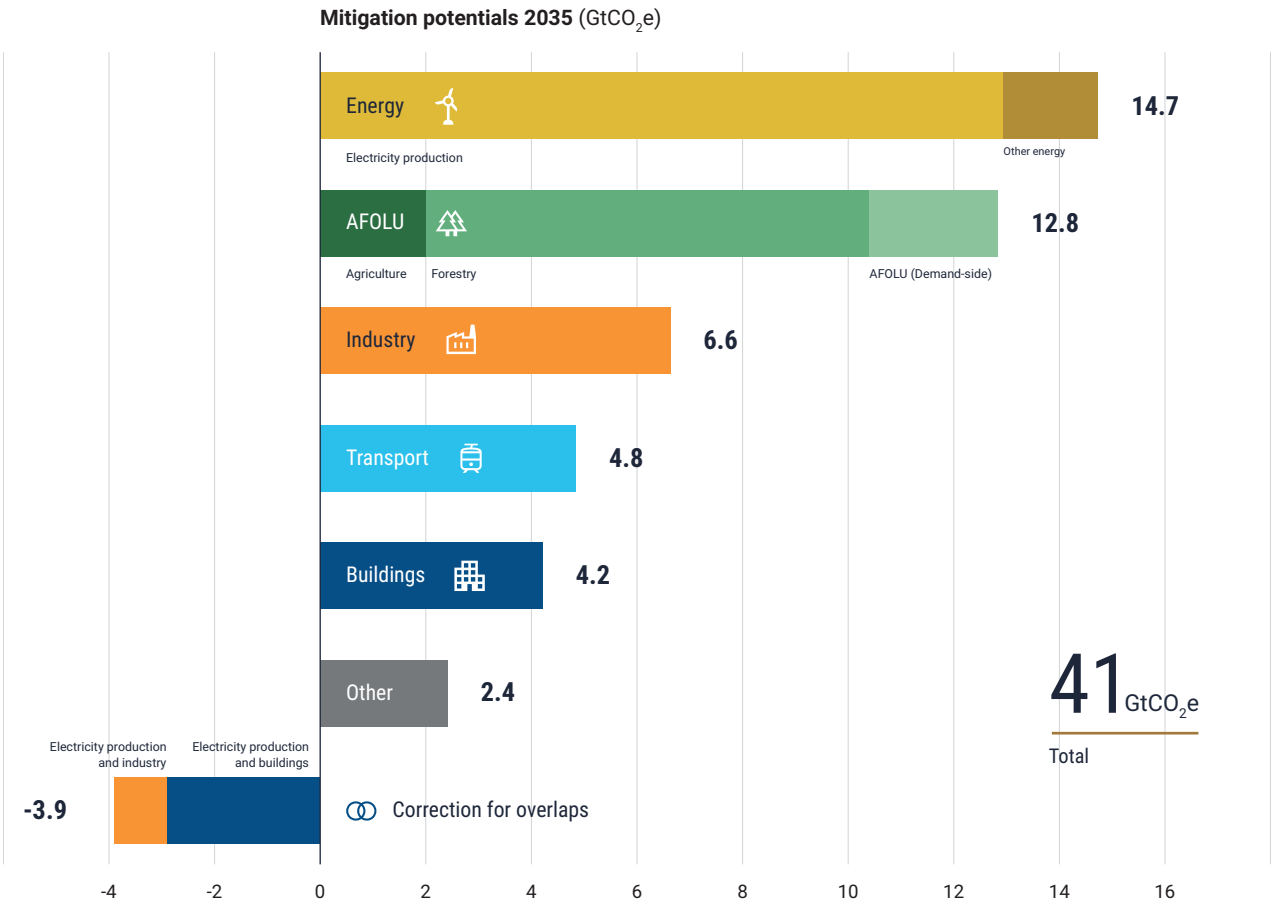
Demand for cooling is a risk. Rising cooling demand further pressures energy systems: global electricity use for cooling could increase from nearly 5,000 terawatt-hours (TWh) in 2022 to up to 18,000 TWh by 2050 under a high-emissions pathway (UNEP 2025d). Although efficient technologies and supportive policies could keep electricity demand close to current levels, climate-driven increases in cooling, water pumping and other energy services may offset efficiency gains and constrain demand-side emissions reductions (van Ruijven, De Cian and Sue Wing 2019; Bezerra *et al.* 2021).

Mitigation pathways must be designed for robustness amid climate risk and uncertainty (Lecocq *et al.* 2022). Accelerated mitigation involves trade-offs. Poorly designed policies risk lock-in, increase land-use pressures and generate social or economic disruption, especially under overshoot conditions (Chapter 4). Effective strategies must therefore integrate equity, justice and risk management while addressing persistent barriers—including vested interests, limited international cooperation, financial and infrastructure constraints, and supply chain challenges—through strong governance, strategic policy sequencing and inclusive institutions (O'Brien 2016).



Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 65

Figure 3.1: Overview of annual mitigation potentials by 2035 by sector up to USD200/tCO_2e



Source: UNEP 2024b

3.3 Strategies to bring global warming back below 1.5°C

Moving from halting to reversing global warming. Building on the mitigation pathways outlined in the previous sections, returning warming to 1.5°C after an overshoot requires going beyond what is necessary to halt global warming**.** Halting global warming at any level below 2°C already requires reaching at least net-zero CO_2 emissions globally, along with deep reductions of other GHGs, particularly methane (IPCC 2021). Reversing global temperature would rely on mitigation efforts going beyond this, to reach sustained global net-negative CO_2 emissions alongside continued further reductions in residual non-CO_2 GHGs. The higher the magnitude of exceedance, the larger the cumulative net-negative CO_2 emissions required, making early mitigation to limit peak warming a prerequisite (Section 3.2).

Nature's carbon stocks must be preserved. Minimizing losses of existing carbon stocks in a warming climate will require proactive adaptation in forest and ecosystem management (Cook-Patton *et al.* 2021; Park *et al.* 2025; Buma *et al.* 2026; Ciais *et al.* 2026; Schädel *et al.* 2026). Minimizing residual CO_2 emissions therefore limits the scale at which CDR needs to be deployed, increases flexibility and reduces trade-offs with such deployment. Accelerated near-term mitigation to minimize the magnitude of exceedance would also reduce the risk of climate change feedbacks jeopardising a return to 1.5°C through accelerated carbon losses from ecosystems. Achieving global net-zero CO_2 is a challenging but essential milestone for the world to halt global warming.

Two complementary strategies are available to achieve net-negative CO_2 emissions (See Figure 3.3). The first is to reduce residual emissions while maintaining CDR

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 66

at the same rate as at the point when global net zero emissions are first reached. The second is to further scale up CDR beyond the level needed to offset remaining emissions at the point of net zero. In practice, achieving sustained net-negative emissions is likely to require both approaches, with the balance differing across sectors and regions.

Minimizing residual emissions is a key strategy. Global integrated assessment model (IAM) results suggest that 10 Gt or more of residual CO_2 emissions could remain when global net-zero CO_2 emissions are reached and thus need to be counterbalanced by the equivalent amount of CDR (Gidden *et al.* 2026a). Reducing these residual emissions further could enable net-negative emissions without proportionally increasing CDR (Reisinger *et al.* 2025; Tavoni *et al.* 2026). Scenarios assessed in the IPCC AR6 and developed subsequently differ materially in the amount of residual emissions modelled to remain at the point of global net-zero CO_2 emissions, spanning a range from about 2 to almost 15 Gt CO_2 (Lamb 2024; Gidden *et al.* 2026a), reflecting different policy choices, technology assumptions and development pathways (Figure 3.2). This wide range indicates substantial scope to reduce residual emissions further through more ambitious mitigation. Nevertheless, most scenarios that return warming to 1.5°C after a peak rely on further upscaling of CDR beyond the level achieved at net-zero CO_2, with removals reaching between about 15 and 24 Gt CO_2 per annum in 2100 to achieve deeply net-negative CO_2 emissions (Gidden *et al.* 2026a).

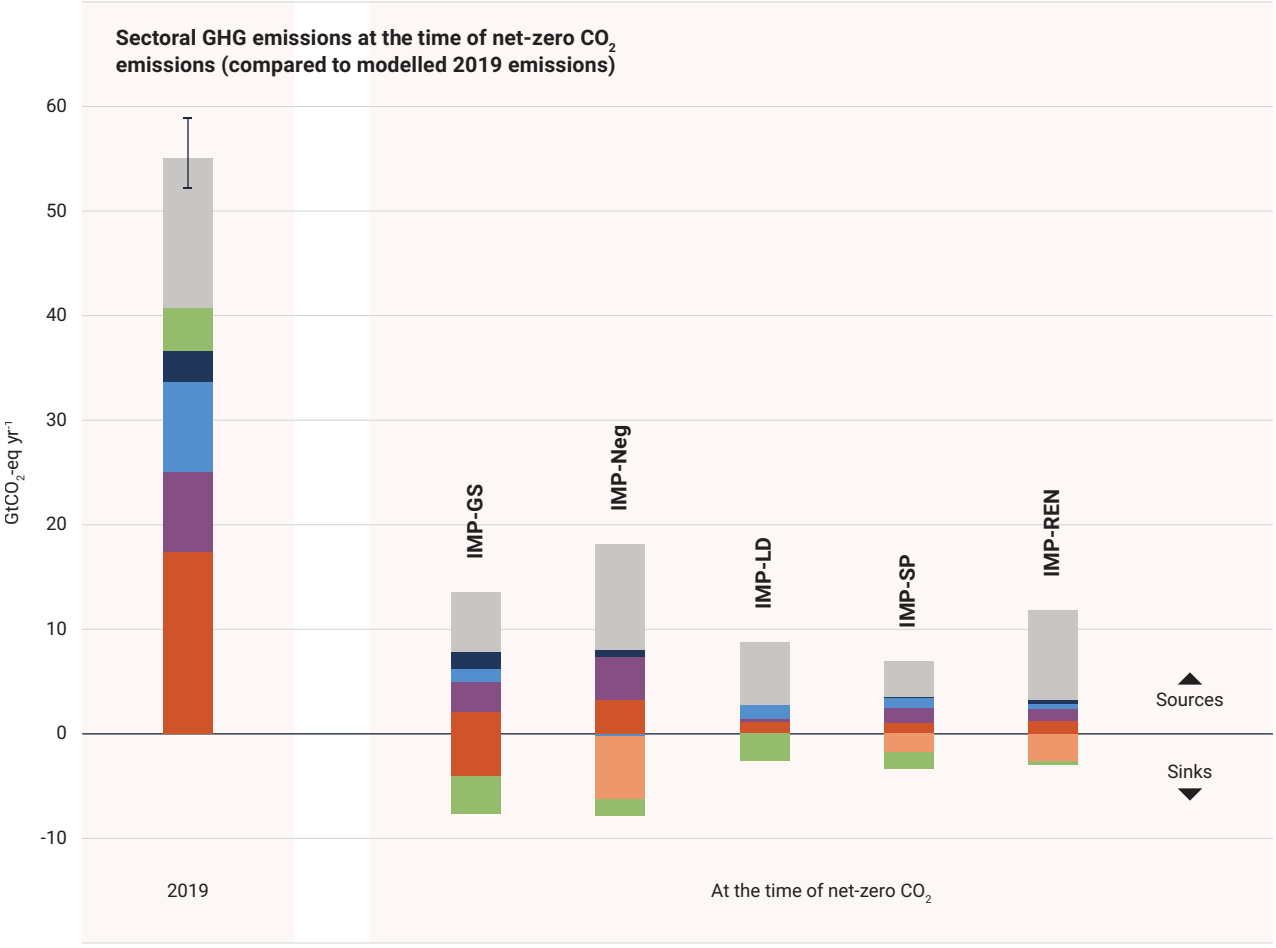
Balancing emissions cuts and CDR. The relative contribution of emissions reductions and CDR has important implications for the sustainability, feasibility and risk of achieving a temperature decline. Strategies that minimize residual emissions reduce dependence on large-scale carbon removal, increasing flexibility while lowering environmental and social trade-offs associated with extensive CDR deployment. However, some emissions are challenging to avoid entirely or rely on large-scale biofuel production (e.g. aviation fuels), highlighting the challenges of sustaining net-negative CO_2 emissions (see Section 3.4).



© the-transport-enthusiast / Unsplash

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 67

Figure 3.2: Examples of residual GHG emissions and CO_2 removals at the time of global net-zero CO_2 emissions are reached in modelled mitigation pathways assessed in the IPCC AR6 that limit global warming likely to 2°C and below



Source: IPCC 2022b

Note: Coloured bars indicate residual gross CO_2 emissions and CO_2 removals, grey bars indicate residual non-CO_2 emissions. Individual scenario names refer to Illustrative Mitigation Pathways used in the contribution of Working Group III to the IPCC AR6 (IPCC 2022b).

There are limits to conventional CDR. To give a sense of scale of the net-negative CO_2 emissions needed to achieve a decline in temperature, total global afforestation and reforestation currently achieve about 2.2 [1.8–2.6] $GtCO_2$ removals per annum (Smith *et al.* 2026). Even if global fossil CO_2 emissions reached zero and deforestation were halted entirely, it would take about 100 years of sustained afforestation and forest management activities at the current scale to reduce global temperature by 0.1°C. Upscaling carbon storage in terrestrial ecosystems (such as via afforestation, forest management, soil carbon storage) is inherently prone to reversal and constrained by land suitability and increased risk of climate-driven disturbances (Burton *et al.* 2024; Jäger *et al.* 2024; Liang *et al.* 2025; Schädel *et al.* 2026).While protecting and enhancing ecosystems and utilising natural carbon sinks can have large benefits for biodiversity and livelihoods, evidence remains insufficient that such approaches alone can deliver net- zero let alone net-negative CO_2 emissions at the global scale (Smith and Torn 2013; Dooley, Nicholls and Meinshausen 2022; Niu *et al.* 2024; Tölgyesi *et al.* 2025).

Novel CDR also faces limits. The temperature reduction achievable through further upscaling novel CDR that relies on geological carbon storage is not unlimited once geologic, environmental, human and policy risks to carbon storage in sedimentary basins are taken into

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 68

account. A recent study estimated storage capacity in sedimentary basins at below 1,500 $GtCO_2$ (Gidden *et al.* 2025). If residual CO_2 emissions remain at the higher end of global scenarios, e.g. at 10 $GtCO_2$ per year from 2050 (Lamb 2024), this capacity could be exhausted by 2200 even just to maintain net-zero CO_2 emissions. However, if residual emissions were halved to 5 $GtCO_2$, then the same amount of CDR would deliver a temperature decline of about 0.1°C over 50 years.

Overall, CDR cannot deliver a high temperature decline. Even optimistic CDR scaling is unlikely to deliver a temperature reversal beyond a few tenths of a degree this century, and the feasibility of this depends strongly on concurrent further reductions of residual CO_2 emissions. Even a decline of 0.2–0.3°C within a few decades would require globally coordinated policy action far beyond the net-zero emission frameworks currently dominating national and corporate climate targets (Section 3.4).

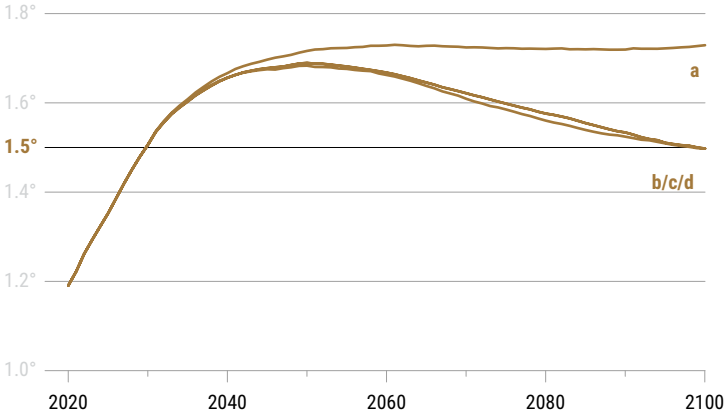
Reducing short-lived climate pollutants post-peak can be effective. Reducing emissions of short-lived climate pollutants, particularly methane, is an effective additional and complementary way to rapidly reduce global warming after its peak**.** Many long-term modelling studies roughly halve methane emissions by mid-century but leave on-going emissions of about 150–200 Mt methane per year unabated in 2050 (Byers *et al.* 2022; Riahi *et al.* 2022). Further reductions of those residual emissions beyond 2050 by 60–70 Mt methane could lower temperatures by about 0.1°C over the following 50–100 years (Forster *et al.* 2021; Shindell *et al.* 2024). Such reductions would be challenging as they need to tackle emissions from agriculture and waste, assuming that most methane emissions associated with fossil fuel extraction and use would have been eliminated already by 2050 given the significant low-cost abatement options (Riahi *et al.* 2022; Shindell *et al.* 2024; UNEP 2025c). Tackling unabated emissions from agriculture and waste could therefore make an important (though limited) contribution to achieve a more rapid and deeper temperature decline than is possible through net-negative CO_2 emissions alone.[13]

Figure 3.3 illustrates conceptually these three key strategies that could contribute to a decline of several tenths of a degree Celsius in temperature and a potential return to 1.5°C by the end of the 21st century: further reductions of residual CO_2 emissions, further reductions of residual emissions of non-CO_2 forcers (particularly methane but also nitrous oxide and black carbon; see also Grant *et al.* 2025b) and further upscaling of CDR. None of these strategies is likely to be sufficient alone; all must build on but go beyond reductions envisaged already in net-zero pathways and face significant feasibility constraints (Section 3.4). A combined, regionally differentiated approach is therefore essential.

13 As noted in Chapter 1, a reduction in temperature by 0.1°C requires about 220 Gt net-negative CO_2 emissions as best estimate. A sustained reduction of residual methane emissions by 60–70 Mt methane would therefore have the same effect on temperature over the following 50–100 years as an additional 220 Gt net-negative CO_2 emissions (Shindell ***et al.*** 2024; Collins ***et al.*** 2019).

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 69

Figure 3.3: Pathways returning warming to 1.5°C after overshoot, compared with stabilizing at 1.7–1.8°C. Overshoot, peak and decline pathways achieve this through deeper CO_2 cuts, enhanced methane reductions or increased CDR

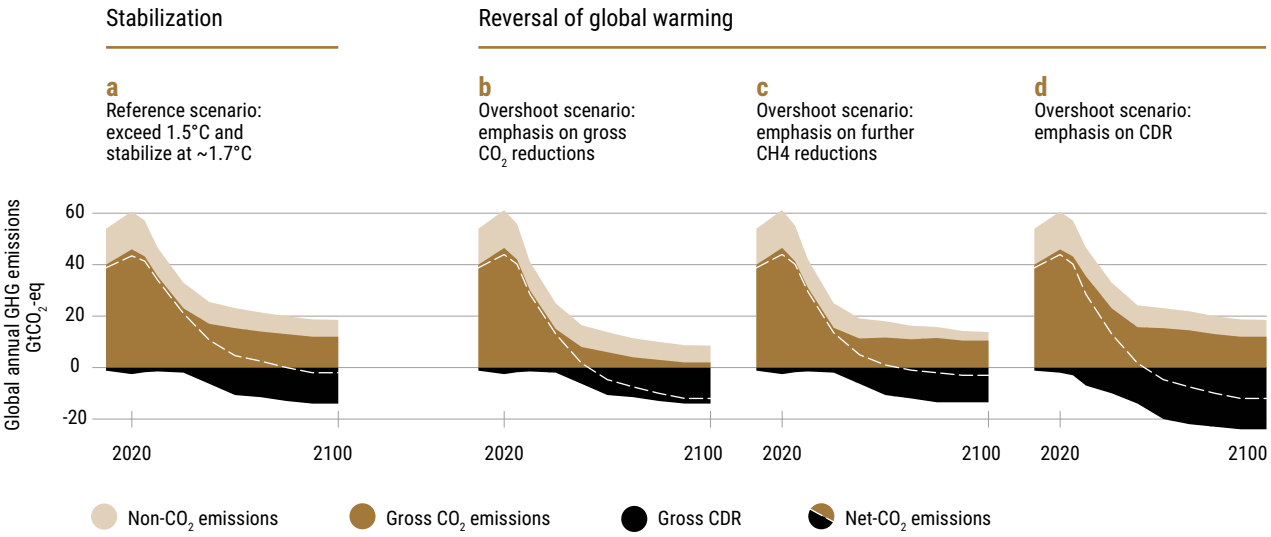


There are three different types of mitigation efforts that can achieve a decline in temperature after a peak in an overshoot scenario

a - Stabilising global warming at 1.7°C requires deep reductions in gross CO_2 emissions, and upscaling carbon dioxide removal (CDR) to reach net-zero CO_2 emissions, and deep reductions in methane emissions (non-CO_2)

To achieve a decline in temperature, even greater efforts are needed than is needed for mere stabilization by:

b - Significantly reducing residual CO_2 emissions
c - Reducing methane emissions even further
d - Further increasing CDR.



Source: Reisinger *et al.* 2025

Note: This figure shows the change in global temperature (top panel) under three illustrative example pathways (bottom panel, b-d) that would bring global warming back to 1.5°C after a period of overshoot, compared to a mitigation pathway that stabilizes global warming between 1.5°C and 2°C (bottom panel, a). The stabilization pathway (a) implies mitigation efforts substantially more ambitious than current policies and NDCs (Chapter 1 and Section 3.2; UNEP 2025b): it exhibits rapid reductions in CO_2 emissions and a gradual increase in CDR to reach net-zero CO_2 emissions in about 2075; these reductions are accompanied by immediate reductions in non-CO_2 emissions, particularly methane, but limited further reductions beyond 2050. The three illustrative overshoot, peak and decline pathways (b-d) reach a similar peak warming level but then return global warming back to 1.5°C by 2100. In near-term, they follow similar emission reduction trends to the stabilization pathway (a) but differ in the additional mitigation effort beyond 2050 to reverse global warming. Pathway (b) achieves deeply net-negative CO_2 emissions by further reducing residual CO_2 emissions while maintaining CDR at the same level as the stabilization pathway; pathway (c) relies mainly on further reducing residual methane emissions while maintaining similar CO_2 emissions and removals as the stabilization pathway; pathway (d) achieves deeply net-negative CO_2 emissions by further increasing CDR while maintaining similar gross CO_2 and non-CO_2 emissions as the stabilization pathway.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 70



3.4 Feasibility, equity and avoiding over-reliance on a future temperature decline

3.4.1 Feasibility of accelerated near-term emission reductions

The barriers are not technological or geophysical. Feasibility challenges along near-term pathways are predominantly institutional, economic and practical. The rapid pace of emissions reductions implied by 1.5°C pathways exceeds historical mitigation efforts and requires unprecedented governance capacity, policy coherence, investments in technology and innovation and scale up finance (Vinichenko *et al.* 2021; Pathak *et al.* 2022). Institutional readiness, including legal frameworks, planning authorities, permitting systems and inter-sectoral coordination, remains a key limiting factor (Bertram *et al.* 2024). For many countries and regions, development needs are a priority, therefore mitigation options that support economic development are more politically feasible.

Finance flows are not enough to support accelerated decarbonization. While mitigation options costing under USD100 per ton CO_2-eq can deliver more than half of global emissions reductions by 2030–35, global climate finance flows remain three to six times lower than what is estimated to be needed for consistent 2030 targets (IPCC 2022b). This constrains both deployment and economic feasibility. Overall, the energy system alone requires approximately USD2.4 trillion per year for deployment of renewables, grids, storage and efficiency measures (Kreibiehl *et al.* 2022).

Equity and justice are central to accelerated near-term reductions (Table 3.1). Within countries, transitions affect fossil-dependent workers and regions (Nacke *et al.* 2024), requiring just transition policies (Lecocq *et al.* 2022). Across countries, differing capacities and responsibilities shape mitigation potential, making access to finance, technology and capacity-building critical. Ignoring equity and justice risks undermining political support and increasing reliance on long-term, riskier options such as large-scale CDR. In contrast, equitable frameworks enhance legitimacy, durability and alignment with development goals (Table 3.1).

3.4.2 Further reducing residual emissions beyond mid-century

Temperature decline depends on reducing residual emissions. Given the potential limits, risks and trade-offs associated with large-scale CDR, further reductions of residual CO_2 and non-CO_2 emissions are essential to achieve a future temperature decline. Such reductions are inherently challenging as these represent emissions that will have proved harder to abate than others up to the point of reaching net-zero CO_2 emissions (Ganti *et al.* 2025). However, the concept of 'hard-to-abate' emissions potentially hides a range of factors (economic, technical, social, political) that can be addressed by different policy mechanisms (Gidden *et al.* 2026b).

Hard-to-abate emissions can be tackled. Some emission sources with high abatement costs can be reduced through sustained technology innovation and deployment. Demand reduction, material substitution, and material efficiency can lower reliance on carbon-intensive products such as steel and cement. Structural shifts are slow and institutionally and politically challenging, reinforcing the need to anticipate net-negative targets and avoid fossil fuel lock-in through near-complete phase-out.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 71

Estimates of residual CO_2 emissions when global net-zero CO_2 is reached vary across different studies, reflecting the different assumptions of what emissions are considered hard-to-abate and the potential for progress in overcoming barriers to their abatement (Lamb 2024; Gidden *et al.* 2026b).

Agriculture and waste are the next frontier for methane emissions. Further reductions of residual methane beyond mid-century must increasingly target agriculture and waste, since fossil fuel emissions can be largely eliminated at relatively low cost by 2050 already under stringent policies (Sections 3.2 and 3.4.1; Höglund-Isaksson *et al.* 2020; Riahi *et al.* 2022). Agriculture and waste present greater technical, cultural and social challenges and have received relatively little targeted mitigation policy. Emerging livestock methane mitigation technologies show promise (FAO 2023a; FAO 2023b) but remain underrepresented in modelled mitigation pathways (Reisinger *et al.* 2021). Dietary shifts could significantly cut emissions and free land for carbon sequestration (Hayek *et al.* 2020; Humpenöder *et al.* 2024), although implementation must consider nutritional, cultural and livelihood constraints (Kaljonen *et al.* 2021; Zhao *et al.* 2024). Societal preferences can also evolve in response to changing contexts and socio-cultural narratives (Berger and Creutzig 2026). Waste-sector measures also offer mitigation with co-benefits for health and air quality (Xuan Hoy *et al.* 2023; Wang *et al.* 2024; UNEP 2025c).

Innovation can cut emissions further. Addressing residual emissions inherently requires going beyond closing efficiency gaps, using available technology or relying on co-benefits to drive adoption**.** Achieving emissions reductions beyond those implemented already by mid-century in ambitious mitigation pathways will increasingly depend on social and market innovation alongside further technological progress. Most of the existing literature on demand-side interventions focuses on their potential contribution to mid-century emission targets. Even deeper reductions beyond mid-century will remain challenging to just transitions within countries and to the distribution of effort among countries, but demand-side strategies can also alleviate some pressures


© kyle-hinkson / Unsplash

associated with shifting material requirements (Gidden *et al.* 2023; Creutzig *et al.* 2024; Okedele *et al.* 2024; Pelz *et al.* 2025b; Song, Li and Lee 2025a; Table 3.1).

3.4.3 Further upscaling CDR beyond mid-century

Taking CDR beyond net-zero will be complicated. Further upscaling CDR, beyond the level required already to achieve net-zero CO_2 emissions, faces multiple, quantifiable biophysical, technological, economic and governance constraints, with the key constraints depending on the method (Tavoni *et al.* 2026). Recognizing and addressing these constraints will be critical to avoid overreliance on CDR while enabling its sustainable deployment to help achieve a long-term decline in global temperature. Conventional CDR methods that require large land resources, including afforestation, reforestation and other natural carbon sinks, are limited by competing demands for pastures, water, biodiversity protection and local livelihoods, but can also have strong synergies if implemented well (Smith *et al.* 2019b). Current model estimates suggest that sustainable afforestation and reforestation could

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 72

remove about 5.6 [3.3–8.4] $GtCO_2$ per year by 2050, with limited potential for further expansion (Gidden *et al.* 2026a). Warming-induced ecosystem feedbacks, such as increased fire frequency and drought, could reduce and partly reverse carbon storage in terrestrial ecosystems (Liang *et al.* 2025; Buma *et al.* 2026; Schädel *et al.* 2026). While important for net-zero CO_2 emissions, it is unlikely to deliver net-negative CO_2 emissions at scale without deeper cuts in residual emissions.

Most return pathways rely on novel CDR technologies alongside afforestation. These include bioenergy combined with carbon capture and storage (BECCS) and DACCS, both of which ultimately store CO_2 in geological formations; biochar, a form of charcoal produced from plant biomass that is spread on or incorporated into soil and that retains carbon over centuries; enhanced rock weathering, which relies on crushing and spreading some types of rock that absorb carbon when exposed to air and durably bind it (Babiker *et al.* 2022; Edwards *et al.* 2026; Gidden *et al.* 2026a).

Current novel CDR provides little carbon storage. Although these approaches generally provide more durable carbon storage than terrestrial biomass, they currently account for less than 0.1 per cent of conventional CDR (Smith *et al.* 2026). Nonetheless, deep mitigation scenarios project rapid expansion to 0.9–6.4 $GtCO_2\ yr^{-1}$ by mid-century and 4.7–17.8 $GtCO_2$ yr-1 by 2100. Even pathways with the least overshoot require total CDR to increase from around 2.2 $GtCO_2\ yr^{-1}$ today to 2.7–4.1 $GtCO_2\ yr^{-1}$ by 2035 and 6.5–13.3 $GtCO_2\ yr^{-1}$ by 2050, illustrating the scale-up challenge. Pathways with delayed mitigation require substantially higher deployment to return to 1.5°C, reaching 8–23.6 $GtCO_2$ yr-1 by 2100 (Gidden *et al.* 2026a).

Upscaling novel CDR involves trade-offs. The feasibility of novel CDR methods depends on technology readiness, costs and resource requirements, as well as potential trade-offs with sustainable development goals (Gidden *et al.* 2026a) and climate adaptation (Chapter 4). The scale of these trade-offs varies by technology, location and governance, particularly through demands on land, water and energy. While most novel CDR methods do not inherently pose greater risks to biodiversity and food security than conventional CDR, larger deployment scales increase the likelihood of exceeding sustainability limits (Smith *et al.* 2019b; Prütz *et al.* 2026). For example, some IPCC AR6 pathways envisage an increase in land used for energy crops by several hundred million hectares by 2100. By contrast, more recent studies that explicitly incorporate sustainability constraints generally limit deployment especially of BECCS to one million hectares or less and up to a few gigatons per year (Deprez *et al.* 2024; Prütz *et al.* 2026). DACCS has fewer land constraints but is highly energy-intensive and remains costly (approximately USD100–600 tCO_2^{-1}), limiting deployment where low-carbon energy is constrained (IPCC 2022b; van der Spek *et al.* 2025).

Institutional and socio-economic barriers impose additional constraints. Modelled pathways show that effective scaling of CDR depends on governance capacity, finance and infrastructure (Smith *et al.* 2019b; Bertram *et al.* 2024), while local integration with energy and land systems, labour availability and safeguards for livelihoods are also critical (Gidden *et al.* 2026a). Differences in technical capacity and financial resources between countries, together with the uneven distribution of CDR potential, raise important equity concerns and reinforce the need for international cooperation, technology transfer and robust governance frameworks (Lee *et al.* 2021; Yang *et al.* 2023; Ganti *et al.* 2025; Pelz 2025b; Table 3.1).

CDR faces credibility risks. Measurement, reporting and verification requirements for CDR are complex and evolving, with credibility risks if standards are not met. Failure to meet these standards could undermine confidence in net-negative emissions pathways by reducing the credibility of reported removals. Public acceptance and social acceptability also influences deployment, particularly where land competition is high. These socio-institutional and economic factors underline that technical potential alone is insufficient; scaling CDR requires near-term investment in governance, capacity-building and stakeholder engagement (Edenhofer *et al.* 2025; EEA 2025).

Ocean-based CDR is uncertain and challenging. Ocean-based CDR approaches face significant uncertainties and challenges regarding their effectiveness, environmental impacts and governance, with additional limits from

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 73

delayed climate responses, complex ocean–atmosphere feedbacks and challenges for monitoring, reporting and verification (Boyd *et al.* 2024; Chopin *et al.* 2024; Yamamoto, DeVries and Siegel 2024; Delval *et al.* 2025; Doney *et al.* 2025). Relevant intergovernmental instruments and decisions on this topic apply precautionary approaches to these activities, although their scopes differ. In 2010, Parties to the Convention on Biological Diversity (CBD) adopted a decision inviting Parties to ensure no large-scale climate-related geoengineering activities that may affect biodiversity take place until there is an adequate scientific basis. Separately, in 2013, Parties to the London Protocol adopted a resolution to regulate the placement of matter for ocean fertilization and other marine geoengineering activities, although this amendment is not yet in force. Research nevertheless continues on approaches to enhance the ocean's absorption of CO_2 from the atmosphere (Babiker *et al.* 2022; Filbee-Dexter *et al.* 2024).



3.4.4 Policies and emissions targets consistent with reversing global warming

Peak warming must be minimized. The preceding sections demonstrate that the combined challenges to scaling CDR and further reducing residual emissions are likely to limit temperature decline to only a few tenths of a degree by 2100. Consistent with this, most pathways that return warming to 1.5°C by 2100 generally reach peak warming of no more than 1.8–1.9°C as best estimate (Byers *et al.* 2022; Riahi *et al.* 2022; UNEP 2025a; Gidden *et al.* 2026a). At the same time, recent analyses suggest that the minimum feasible peak warming has increased to around 1.7–1.8°C following delays in global emissions reductions (Bertram *et al.* 2024; Grant *et al.* 2025b; UNEP 2025a; Gidden *et al.* 2026a; Tavoni *et al.* 2026). Whether a return to 1.5°C remains achievable therefore depends on near-term policy choices that deliver rapid emissions reductions while creating the conditions for sustained global net-negative CO_2 and potentially even net-negative GHG emissions after mid-century.

Net-zero is a milestone towards net-negative. For many developed countries, net-zero GHG emissions should increasingly be viewed not as the endpoint of

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 74

climate policy, but as a milestone towards sustained net-negative emissions. Taken together, the findings elicited above imply that mitigation policy can no longer be framed solely around achieving net-zero emissions. Instead, countries need to consider the conditions under which net-negative GHG emissions may become necessary to reverse warming. This interpretation is consistent with Article 4.1 of the Paris Agreement when viewed through the principle of common but differentiated responsibilities. Achieving global net-zero GHG emissions while allowing countries with lower historical responsibility and more limited capacity to meet basic development needs will require many advanced economies to move beyond net zero and achieve net-negative GHG emissions (Klinsky and Winkler 2018; Fyson *et al.* 2020; Li *et al.* 2025b; Robiou du Pont *et al.* 2025). The need for net-negative GHG emission targets would be sharpened further if net-negative GHG emissions are needed globally to return more rapidly from a high overshoot.[14] Keeping a return to 1.5°C within credible reach thus relies at a minimum on net-negative GHG emissions targets for most developed countries beyond 2050 (Geden and Reisinger 2025).

The next decade is crucial for effective and just CDR. Preparing for sustained net-negative emissions requires long-term structural changes in production systems, energy, land use and patterns of demand, supported by sustained investment, innovation and just transitions. Decisions made during the coming decade will shape future technology development, infrastructure and land-use choices, determining whether countries retain the capacity to move beyond net zero if required. Governments will therefore need new policy frameworks and institutions to scale CDR, manage long-term removal obligations and provide clear investment signals to the private sector (Bednar *et al.* 2021). Developing these governance arrangements well before large-scale deployment is required will be essential (EEA 2025).

Governance and international cooperation will have to evolve. A transition towards a net-negative future may amplify the potential for inequities and allocation of responsibilities internationally, which could in turn amplify barriers to collective decision-making (Andreoni, Emmerling and Tavoni 2024). The international community will need to contend with a growing demand for finance and other forms of support for adaptation and dealing with loss and damage (see Chapter 4), while at the same time upscaling financing for on-going mitigation to achieve net-negative emissions futures that ensures sustainability and climate resilience of communities and of mitigation strategies (Honegger 2023). At the same time, mitigation priorities will evolve across the different stages of overshoot: rapid emissions reductions before peak warming; achievement of at least global net-zero CO_2 emissions together with deep reductions in other GHGs at peak warming; and sustained net-negative GHG emissions during the temperature decline stage. Each stage presents distinct equity and distributional challenges that require mitigation strategies, governance arrangements and international cooperation to evolve over time rather than ending once net zero is achieved. Table 3.1 summarises these changing priorities across the stages of overshoot, peak and decline pathways.

14 Global net zero GHG emissions would result in a very gradual decline in temperature of approximately 0.3°C per century, with the rate depending on the balance between residual emissions of short-lived gases such as CH_4 and CDR (Fuglestvedt ***et al.*** 2018; Tarshish ***et al.*** 2026). If global mitigation action is limited to achieving net zero GHG emissions, a return to 1.5°C would be unlikely before the second half of the 22nd century even if peak warming is limited to about 1.8°C. Reducing the duration of overshoot therefore would require global mitigation efforts beyond net zero to reach net-negative GHG emissions globally.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 75

Table 3.1: Feasibility of mitigation strategies across stages of overshoot, peak and decline pathways, considering intergenerational and interregional equity

Strategy: Emission reductions			
Actions	**Immediate response phase**	**Coping and containment phase**	**Long-term resilience phase**
Transition away from fossil fuels	Early action, led by countries with the greatest capacity and responsibility (CBDR-RC), preserves the remaining 1.5°C-consistent carbon budget; delay increases carbon debt and lock-in.	Net-zero CO_2 timing determines peak warming and regional carbon debt distribution; consistent with CBDR-RC, countries with greater capacity and responsibility accrue greater responsibility. Requires managing stranded assets and just transitions. Accrue greater responsibility. Requires managing stranded assets and just transitions.	Residual emissions add to carbon debt relative to 1.5°C and could exhaust feasible and sustainable levels of CDR; delays increase intergenerational burden and removal obligations.
Renewables, low-carbon energy and electrification	Rapid scale-up needed; equity requires leadership from high-capacity countries and inclusive access. Strong governance is required to avoid environmental and social trade-offs.	Institutional and capacity constraints shape deployment; equitable participation in value chains is key for inclusive transitions.	Enables sustained low-carbon systems; demand-side changes and innovation can further reduce hard-to-abate emissions but need inclusive and just transitions.
Methane reductions	Fast reductions, especially of fossil gas limit rate of warming; for agricultural and waste emissions, equity requires support for low-capacity regions and balancing agricultural livelihoods.	Deep (>80%) reductions of fossil gas emissions are feasible alongside net-zero CO_2; scale of agricultural reductions depends on support for agricultural development and innovation, inclusive just transitions and food security.	Demand-side changes and reduced livestock numbers can free land for sequestration, with outcomes depending on context and potential distribution impacts on food security and rural livelihoods. Addressing hard-to-abate emissions relies on innovation and inclusive governance.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 76

Strategy 2: Carbon Dioxide Removal (CDR)			
Actions	**Immediate response phase**	**Coping and containment phase**	**Long-term resilience phase**
CDR (general)	Overreliance risks moral hazard and increases burden on future generations; not a substitute for rapid emission reduction	Ability to achieve net-zero or net-negative emissions depends on level of residual emissions as much as the ability to scale up CDR. A focus on global least-cost deployment of CDR would not result in equitable sharing of costs and would increase risks to sustainable development.	
Conventional CDR (afforestation, ecosystem restoration)	Can provide strong co-benefits but durability of storage depends on governance of reversals; risks to food security and biodiversity if misapplied.	Limited by durability, especially at higher warming, and land constraints, requires strong safeguards for vulnerable groups.	Climate impacts increase reversibility risks; careful governance needed to avoid inequitable outcomes.
Novel CDR (BECCS)	Costs and land demands can shift burdens to land-constrained or lower-capacity regions and increase potential for trade-offs with food security and biodiversity.	Deployment is constrained by land, biodiversity and cost; Costs and land-use competition may create distributional impacts, particularly for food systems and rural livelihoods.	High land demand and sustainability risks; burden falls disproportionately on certain regions if deployment is based on least cost and land availability rather than sustainability and equity.
Novel CDR (DACCS)	Speculative and costly at scale; high costs may concentrate development and deployment in high-income regions	Limited scalability by net-zero; obligations tied to carbon debt and responsibility; costs may reinforce global inequalities depending on access and burden-sharing.	Long-term governance and storage risks; requires equitable burden-sharing and oversight.

Note: CDR is needed in addition to rapid emission reductions, not as a substitute for a failure to reduce emissions. Finance underpins all stages but is not detailed here. This table focuses only on the CDR methods that are most prevalent in IAMs (conventional CDR, BECCS and DACCS). The literature on other CDR methods in relation to equity and feasibility is still limited, and many equity issues are common across CDR methods.


© Khải Nguyễn Thanh / Pexels

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 78

04 Adapting to overshoot realities in the context of development

Adaptation under overshoot is no longer optional — it is urgent, and it must be proactive. The challenges go beyond those addressed in conventional adaptation planning**.** Physical, ecological and social systems respond differently to peak warming and subsequent temperature decline, while risks, vulnerabilities and adaptive capacity vary across regions and over time. Because evidence specific to adaptation under overshoot remains limited, this chapter draws on the emerging scientific literature together with expert judgement to assess how adaptation can anticipate changing risks across the stages of overshoot. It considers how adaptation can reduce irreversible losses where possible, avoid maladaptation and support resilient development, recognizing that adaptation interventions and implementation happen primarily at local and regional scales, not at the global scale at which mitigation and physical trends are often summarised. Regions also warm and cool at different rates, face different hazards and hold different capacities to respond.

Adaptation is not only a complement to mitigation, but also a precondition for it. Critically, preventive adaptation investment can itself help preserve the institutional and financial capacity needed to also sustain mitigation ambition through temperature overshoot, peak and decline — making adaptation not only a complement to mitigation but a precondition for it. Addressing these challenges will, however, require urgent coordinated multilateral political will, appropriate governance responses and planning foresight, visions and imaginations across all scales.

Adaptation is context-specific and heterogeneous. It cannot be reduced to a single curve, technical aggregate and scientific figure, as this would misrepresent how adaptation is actually understood, experienced, planned, financed and lived. Accordingly, this chapter has two aims: to open the conversation about what adaptation in an overshoot world could entail, and to speak directly to those who face on-the-ground realities — practitioners, planners, communities and the most vulnerable, in local cases and across regions.

Transformational adaptation is an overarching requirement. Responding to overshoot requires a futures-oriented, systems-based approach grounded in multilateral political will and the integration of local and regional perspectives instead of global frameworks alone. Rather than relying on incremental adjustments, adaptation must address the underlying drivers of vulnerability and support transformational change across practical, institutional and political spheres (Figure 4.2). All actions must be anchored and undertaken in ethical and just ways (Feola 2015; Göpel 2016; Blythe *et al.* 2018; O'Brien 2018; Fazey *et al.* 2020; IPBES 2024a).

This chapter understands transformational adaptation as:

Adaptation that changes the fundamental attributes of a socio-ecological system in anticipation of climate change and its impacts (Möller et al. 2022) — a fundamental, system-wide reorganization that reaches beyond technology and economic structures to paradigms, goals and values (IPBES 2024b), and that addresses the underlying drivers of climate risk in inclusive ways, enhances the capacity to cope with and recover from future impacts, and guards against maladaptive outcomes now and in the future (Biesbroek et al. 2026).

Meeting this challenge means addressing the root causes of vulnerability through change that is continuous rather than one-off — evolving as overshoot itself unfolds.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 79



4.1 Adaptation in an overshoot context

Under overshoot, adaptation is as essential as mitigation. Both are now preconditions for sustainable development, not trade-offs against it. Adaptation refers to the process of adjustment to actual or expected climate and its effects, and under overshoot it must evolve across the exceedance, peak, decline and stabilization stages. Understanding how those effects unfold across each stage is central to effective adaptation planning and implementation — because the 'thresholds' and 'tipping points' crossed under overshoot rarely arrive as discrete events. They unfold instead as complex processes and pathways — 'non-linear processes'. Crossing the 1.5°C is expected to amplify these non-linear increases in impacts, compounding their complexity and disproportionately affecting the poor and vulnerable (Chapter 2), especially in LDCs where multiple forms of capacity are already constrained.

Business-as-usual responses are inadequate. They do not correspond to the speed and scale of climate, economic and livelihood change (Schlitz, Vieten and Miller 2010; Pereira *et al.* 2020; Salomaa and Juhola 2020). As outlined in Chapter 3, strengthening adaptation and mitigation requires coordinated multilateral political will, governance, finance, equity and justice considerations, attention to loss and damage, and broader enabling conditions. Temperatures returning to 1.5°C will not automatically undo the impacts sustained at prior stages, many of which are irreversible and fall hardest on those least responsible and least resourced (Schleussner *et al.* 2024). Continuous recovery and the revision of planning baselines are therefore already needed and will become more so as temperatures shift (Kropf, Leung and Caughey 2024; Marshall, Grubert and Warix 2025).

These evolving conditions have fiscal and institutional implications (UNEP 2025a). Preventive adaptation investments are more cost-effective than reactive crisis response and help maintain fiscal and institutional capacity as climate impacts intensify. Without such investment, governments risk shifting from long-term planning to reactive crisis management and short-term recovery. Finance ministries and central economic planners therefore play a critical role in managing these trade-offs under overshoot conditions.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 80

Building on this background, the chapter develops the following themes:

1. **Current implementation will not deliver transformational adaptation, and it must be integrated with sustainable development.** Delivering transformational adaptation requires a rethink of today's adaptation and mitigation conditions. International, regional and local agendas need to be integrated, with development and adaptation planned jointly to protect vulnerable people and the ecosystems they depend on. Many of these systems are already degraded, and basic resources—water, food, energy, healthcare—are under growing stress. Left unaddressed, these pressures compound across sectors, ecosystems, finance and governance, demanding urgent, anticipatory attention.
2. **Overshoot will generate persistent, uneven and cascading risks.** Risks will evolve differently across regions and sectors, with irreversible impacts and compounding pressures that may divert resources from wider development priorities, with the deepest displacement in regions where development needs are already most acute.
3. **Adaptation must become systems-based and forward-looking.** Where vulnerability and exposure remain high, risks can stay elevated or increase further under overshoot, following less predictable, short-term trajectories. Persistent and evolving risks require anticipatory planning across ecosystems and societies while addressing long-term impacts on biodiversity, food security, health and human development (Chapter 1; Chapter 2; Meyer *et al.* 2022). Repeated droughts during exceedance, for example, can drive lasting food insecurity, undernutrition, child stunting, impaired human development and increased child mortality (Chapter 2). These dynamics are already emerging under current levels of warming.
4. **Adaptation must remain flexible as conditions change.** Uncertainty during the exceedance, peak, decline and stabilization stages of overshoot requires adaptive infrastructure, iterative planning and flexible decision-making. Adaptation responses—such as the infrastructure cases shown in Table 4.1 below and in the National Adaptation Plans (NAPs)—must therefore be much more adaptive and flexible (Siehr, Sun and Aranda Nucamendi 2022; Haasnoot *et al.* 2024; UNEP 2025a; Theokritoff *et al.* 2026).
5. **Effective adaptation depends on inclusive and just decision-making.** Responses to overshoot must connect international and local action, draw on diverse knowledge systems and place equity, justice and local contexts at the centre of decision-making (Waddock *et al.* 2020; Living in the overshoot age 2026).
6. **Cross-level cooperation must replace siloed responses**. Existing plans can be recalibrated to navigate the stages of overshoot rather than be overtaken by them. Strengthening governance and integrating climate and development agendas will be essential to scale coordinated systems-based, transformational action across all levels.

4.2 Contexts matter: The difficulty in aligning adaptation to lived realities, both now and in the future

Adaptation on the ground still falls far short in scale, in depth and in reach. This is especially true for those most vulnerable and who have contributed least to the warming they must live with. Current adaptation approaches, most acutely in resource-constrained regions but increasingly also in wealthier contexts, do not undertake the deeper, transformational work that overshoot requires. Despite growing attention, adaptation also remains only weakly linked to policy, practice and everyday realities, even as the discourse on overshoot emerges (Reckien *et al.* 2023; Chapter 3).

Planning and implementation also remain poorly aligned. Planned adaptation does not reliably translate into action, and much of the adaptation actually undertaken—by individuals, households and civil society—goes undocumented, making the true extent of progress hard to assess (Berrang-Ford *et al.* 2021). These gaps are most acute where the most severe climate impacts are also emerging, most notably in vulnerable contexts, regions and places — such as in small island nations, parts of Latin America, Africa and Asia (Olazabal *et al.* 2019; Berrang-Ford *et al.* 2021; Magnan *et al.* 2023). Many plans also overlook gender and age dimensions, and fail to address the needs of groups with higher sensitivities and lower capacities to adapt. The health sector, for example, illustrates these challenges: adaptation efforts lag behind current needs (Cissé *et al.* 2022). Overshoot

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 81

will likely widen these implementation gaps, and prolong them, affecting health systems and the upstream drivers of health such as food and water security.

Poorly designed adaptation efforts can have negative consequences. Adaptation efforts may also feed back into the system, reinforcing existing social, economic, infrastructural, technological and ecological risks and vulnerabilities across sectors, regions and timeframes (Figure 4.1) (Reisinger *et al.* 2025; Simpson *et al.* 2025). This occurs when adaptation responses are designed within existing institutional frameworks and power structures that fail to address—and may even entrench—the root causes of vulnerability. Hard coastal defences such as sea walls, for example, can protect high-value assets while shifting risks to lower-income communities and foreclosing longer-term adaptation options such as managed retreat — deepening the underlying drivers of exposure rather than easing them (Hino, Field and Mach 2017; Simpson *et al.* 2021).

Because adaptation plans are not yet fully locked in, a window of opportunity remains. Current adaptation plans can be recalibrated before, rather than after, implementation sets them in place (Table 4.1).

Implementation gaps are chronic and widening. They are especially significant across different development contexts. Adaptation must therefore be integrated further with development to protect communities and ecosystems from climatic changes that are now unavoidable — particularly in the Global South, where resources are limited and development needs remain largely unmet (Berrang-Ford *et al.* 2021; Haasnoot *et al.* 2024; Amorim-Maia and Olazabal 2025).

Given these challenges, systems-based planning for overshoot must begin now. Its horizons must extend across all stages of overshoot (Table 4.1), and its scope must recognize that sectors and systems are interconnected rather than siloed. Planning should be proactive, flexible and just — addressing complexity and focusing on the most vulnerable individuals, communities and ecosystems. This includes addressing gender disparities and intra-household inequalities, and ensuring meaningful participation of women, girls and minorities (UNEP 2023; UNEP 2024a; UN Women and UN DESA 2025).

Adaptation planners also face two interrelated challenges. There is deep uncertainty about the timing and level of peak warming, given warming now exceeding 0.25°C per decade; and multiple adaptation limits are likely to be breached. Planning must therefore account for this uncertainty while preparing for threshold crossings and monitoring potential tipping dynamics.

The impacts are intergenerational. Impacts across multiple sectors—including infrastructural challenges (Table 4.1), health, ecosystem services, livelihoods and education—are expected to leave lasting and intergenerational effects on well-being (Cissé *et al.* 2022; Mohamed *et al.* 2025) and on long-term economic performance (Stern 2007; Burke, Hsiang and Miguel 2015) particularly in least developed countries.

Current adaptation is not fit for purpose. Where adaptation efforts are emerging—across planning, decision-making, political and development arenas worldwide—they often remain limited and require rethinking and repurposing (UNEP 2025a; Chan *et al.* 2026). Even where adaptation has been implemented, it rarely results in transformation (Engbersen, Biesbroek and Termeer 2024; Juhola *et al.* 2024; UNEP 2024a; Wannewitz, Ajibade and Mach 2024; Di Giulio *et al.* 2025): adaptation is instead interpreted and applied in short-term, sector-specific and incremental ways. Such opaque transformational ambitions, unclear timelines and weak, inflexible sequencing logic all risk deepening lock-in and maladaptation rather than addressing overshoot-relevant vulnerabilities (O'Brien 2018; Pelling *et al.* 2018; Simpson *et al.* 2021). Transformational adaptation must integrate development and mitigation, addressing opportunities, constraints and limits, and their implications for equity and justice across all stages of the overshoot pathway.

Transformational adaptation, not incremental adjustment, is urgently needed. Limited coping responses that pass for adaptation, while useful, are insufficient given the scale and depth of change required — particularly for people in poor and marginal contexts and in smaller cities and communities (Milkoreit 2017;

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 82



Elmqvist *et al.* 2018; O'Brien 2021b; Petzold *et al.* 2023; Amorim-Maia and Olazabal 2025). The scale of change required leaves little room for delay.

4.3 Implementation of mitigation and adaptation pathways: Interdependencies and trade-offs

Adaptation actions to reduce and manage the risks of climate change will need to be radically rethought, reimagined and recalibrated under overshoot.

Even the most successful mitigation will not eliminate the need for adaptation. A key point often underemphasized in mitigation-focused discourse is that the 1.5°C level of warming (IPCC 2018a) is not considered safe for most nations, communities, ecosystems and sectors, and continues to pose significant risks to natural and human systems (see Chapter 1, Chapter 2). Large adaptation needs will therefore remain even if mitigation efforts eventually return global warming to 1.5°C. At current warming levels of approximately 1.4°C, adaptation demands are already considerable owing to historical emissions and demands continue to grow as States (including governments, organized business and human lifestyles) persistently fail to meet mitigation targets.

Adaptation and mitigation must be considered together. Overshoot conditions require integrated strategies that manage the synergies and trade-offs between mitigation and adaptation. Current adaptation options too often overlook mitigation linkages (Ürge-Vorsatz *et al.* 2018; Grafakos *et al.* 2020; Sharifi 2020; Sharifi 2021), neglect intersectional inequalities and justice considerations (Anguelovski *et al.* 2016; Olazabal and Ruiz De Gopegui 2021; Amorim-Maia *et al.* 2022; Garcia and Tschakert 2022; Cannon *et al.* 2023), and insufficiently address loss and damage and adaptation limits, at times mislabelling irreversible loss as transformation (Mechler *et al.* 2020). Yet many interventions can achieve simultaneous adaptation and mitigation goals — increasing appropriate urban tree canopy coverage, for example, reduces the urban heat island effect, lowering heat-related morbidity and mortality while also storing carbon (Iungman *et al.* 2023). Overshoot impacts and responses may also deepen vulnerability, especially across regions with high adaptation deficits. Weaker near-term mitigation will intensify severe, inequitably distributed and irreversible impacts across natural and human systems, reaching even the most basic of needs such as water, food and

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 83

health (Riahi *et al.* 2022; IPCC 2022a; Schleussner *et al.* 2024). Delayed mitigation will also directly escalate adaptation costs and losses, particularly for more vulnerable populations, deepening existing global, inter-regional and intra-regional inequities (IPCC 2022b; Chapter 3).

Crisis response diverts valuable resources. Where proactive adaptation is inadequate, scarce resources are often diverted away from forward-looking adaptation, mitigation and development towards more reactive crisis response to escalating climate impacts (Aligishiev, Bellon and Massetti 2022; Raikes *et al.* 2019). Effective transformational adaptation should instead provide tangible, actionable solutions that increase the safety, sustainability and well-being of human and natural systems in the near term, even as mitigation benefits slowly unfold.

Insufficient adaptation may constrain mitigation ambition. Transformational adaptation is a precondition for the ambitious mitigation that overshoot demands. While it is commonly asserted that mitigation supports successful adaptation, in the sense that greater mitigation can reduce future adaptation needs, the reverse is equally true: insufficient adaptation can itself constrain mitigation ambition, particularly where reactive disaster response absorbs the fiscal and institutional capacity that both ambitious mitigation and forward-looking adaptation require (Aligishiev, Bellon and Massetti 2022; Bellon and Massetti 2022; Panwar, Wilkinson and Nur 2023).

Preventive transformational adaptation investment is highly cost-effective. In low- and middle-income countries, each dollar invested in climate-resilient infrastructure yields about four dollars in avoided losses (Hallegatte, Rentschler and Rozenberg 2019). IMF analysis confirms that ex-ante adaptation investment significantly reduces ex-post remedial costs and improves long-term macro-fiscal outcomes (Aligishiev, Bellon and Massetti 2022; Bellon and Massetti 2022). Countries with stronger adaptive capacity can therefore arguably spend less on reactive emergency response, freeing fiscal and political space for sustained investment in mitigation and longer-term adaptation — although this margin may narrow as cascading and compounding climate risks intensify. Without such investment, intensifying impacts may compel governments to prioritize disaster response over forward-looking action, creating a self-reinforcing feedback loop in which insufficient adaptation erodes the capacity for mitigation and adaptation across subsequent overshoot stages — potentially prolonging the exceedance stage (Reisinger *et al.* 2025). This dynamic is already evident in small island developing states, where the constant diversion of scarce resources toward repeated disaster recovery limits investment in long-term adaptation and development, despite these States' minimal contribution to global emissions (OECD and World Bank 2016; Panwar, Wilkinson and Nur 2023).

Limited or misguided adaptation during the exceedance stage has repercussions — across multiple sectors and for the most vulnerable countries, communities and people (Simpson *et al.* 2021; IPCC 2022b Figure 16.1; Figure 2.1). Conversely, effective and proactive adaptation and mitigation before and during the overshoot period could reduce vulnerability and so lower overall risk.

Transformational adaptation must recognize that successful outcomes will evolve as temperatures rise then fall — and that for many communities, the reversal of global mean temperature will not automatically reverse the harms sustained during the overshoot period.

Stage-specific adaptation under overshoot

Abrupt regime shifts and possible irreversible change can outpace or undermine current adaptation approaches. Most existing adaptation frameworks—whether sectoral, ecosystem-based or infrastructure-focused—were designed around assumptions of gradual, continuous and one-directional climate change. However, the consequences remain uncertain for climate, ecosystems and infrastructure and are further compounded because future populations will differ in their governance, socioeconomic conditions and demographic composition, with direct implications for human systems' exposure and vulnerability to impacts (Chapters 2 and 3). The need for cross-sectoral, systemic and flexible approaches to adaptation is well established (IPCC 2022b; SR1.5). Exceedance of 1.5°C does not

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 84

create this need, but it fundamentally complicates it. As outlined in section 4.1, warming that rises, plateaus and eventually falls rather than continuing in one direction fundamentally reshapes adaptation requirements. Strategies must function under worsening conditions, withstand a potentially prolonged peak and remain relevant as conditions eventually change in multiple directions alongside broader development dynamics.

Adaptation must be flexible and evolve. Adaptation investments rigidly calibrated to any single stage of the overshoot exceedance, peak and decline pathway risk being poorly matched to the conditions that follow (Pfleiderer, Schleussner and Sillmann 2024; Reisinger *et al.* 2025). Agricultural systems reconfigured for higher temperatures may prove misaligned if conditions shift. Infrastructure designed for specific hydrological regimes, for example, may face markedly different water availability as glaciers undergo irreversible loss (Schuster *et al.* 2025). Coastal defences, while unlikely to become redundant given continued sea-level rise, may, for example, entrench rigid protection strategies that foreclose more flexible or transformational responses, such as managed retreat or planned relocation of communities and infrastructure away from increasingly vulnerable coastlines. The challenge is therefore not simply adapting to a changing climate, but navigating a trajectory characterized by uncertainty, uneven legacies, evolving risks and hence evolving adaptation needs over time (Figure 4.1) (Haasnoot *et al.* 2020).

For example:

- *High-latitude and polar regions* warm at two to four times the global mean rate and may cool more slowly as ice-albedo and permafrost feedbacks continue to operate (Lee *et al.* 2021; Rantanen *et al.* 2022; Pfleiderer, Schleussner and Sillmann 2024);
- *Small island nations and territories* face disproportionate and ongoing exposure to sea-level rise already locked in by historical emissions and ocean thermal inertia, which will continue well beyond the temperature peak (In Focus: Sea-level rise and the SIDS adaptation challenge) (Fox-Kemper *et al.* 2021; Nauels *et al.* 2025); and
- *Arid and semi-arid regions* may experience prolonged hydrological disruption that persists after the thermal peak (Douville *et al.* 2021; Seneviratne *et al.* 2021).

Across the water sector more broadly, adaptation effectiveness decreases past 1.5°C (Caretta *et al.* 2022; Lissner *et al.* 2024; IPCC 2022c).

The current piecemeal, silo-based approach is insufficient for the coming challenges. In practice, multiple phases will coexist across and within regions, and impacts are expected to accumulate dynamically across the overshoot, peak and decline pathway, with each stage inheriting the legacies of those that preceded it.

Establishing the adaptation foundations under current conditions

Adaptation under current conditions forms the foundation for all later stages. The window to establish adaptive governance, robust monitoring processes, modular infrastructure and flexible investment frameworks is now. The unpredictable character of overshoot, peak and decline pathways changes the investment logic: systems must be designed not for a single projected future, but for conditions that will first worsen, potentially stabilize and then change in uncertain ways. Because any reversal of warming may occur only decades later, it has limited relevance for near-term adaptation planning and immediate transformational adaptation needs: decisions taken now must respond to the stage at hand rather than to an eventual and distant return to lower temperatures (Schleussner *et al.* 2024). This requires long-term planning horizons embedded in infrastructure decision-making (Bonjean Stanton and Roelich 2021) and in governance frameworks that outlast political cycles and integrate decision-trigger mechanisms such as adaptation pathway approaches (Haasnoot *et al.* 2013).

Making the right infrastructure decisions is crucial. Infrastructure decisions made during this stage (Table 4.1) have operational lifetimes of decades to centuries and will lock in either vulnerability or resilience through the entire overshoot trajectory and beyond. This applies to coastal protection, water systems, energy networks,

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 85

urban form and transport. Across small island nations and territories, for example, this window is particularly narrow: freshwater lenses are highly sensitive to sea-level rise and drought, and once salinized may not be able to recover (Terry and Chui 2012; Storlazzi *et al.* 2018). This creates an urgent need for early, modular investment in water security.

The duration and severity of each stage will depend on how quickly emissions are reduced, how the climate system itself responds and on development choices.

During exceedance: managing progressive intensification

The exceedance stage is expected to bring intensification of climate stress, although not uniformly. In some regions, tipping point dynamics may introduce abrupt shifts alongside gradual change (Lenton *et al. 2025*). Anticipatory humanitarian action, pre-positioned emergency supply chains, heat action plans, early warning systems, scalable social protection and other adaptation strategies must already be operational during this stage, not established in response to it (Coughlan de Perez *et al.* 2015). Without these measures, vulnerabilities already emerging under current warming conditions are likely to intensify further.

Climate risks will compound across sectors. Cascading and compounding events are also expected to become more frequent, straining systems across sectors simultaneously (Simpson *et al.* 2021; O'Neill *et al.* 2022). The exceedance stage is also the first serious test of the adaptive capacity built under current conditions, and when monitoring systems must actively track the approach of critical thresholds that may be crossed at or near peak warming (Reisinger *et al.* 2025).

At peak warming: managing limits, cascading events and systems survival

At peak warming, the dynamics building during exceedance converge and intensify. This means adaptation limits being reached, cascading and compounding events, and the depletion of institutional capacity (Armstrong McKay *et al.* 2022; O'Neill *et al.* 2022). Governance frameworks and financing mechanisms must be operational for the managed relocation of populations from areas crossing habitability thresholds, whether due to lethal humid-heat conditions, coastal inundation or the collapse of subsistence systems (Hino, Field and Mach 2017; NASA Sea Level Change Team 2023; NASA Sea Level Change Team 2024).

Monitoring systems during this stage must function as active decision-triggers. This systems should be supported by pre-agreed response protocols activated when indicators—such as ice sheet mass balance, ecosystem regime shifts, freshwater lens salinity or humid-heat conditions approaching physiological survival limits—signal that critical boundaries are being approached or crossed (Raymond, Matthews and Horton 2020b; Lenton *et al.* 2025).

The peak stage also carries acute fiscal and political risks. Governments, humanitarian agencies, non-governmental organizations and local community 'first responders' will face the highest simultaneous demand for disaster response, social protection, emergency health services and infrastructure repair — while budgets will likely become severely constrained by accumulating climate costs (Catalano, Forni and Pezzolla 2020) and political attention is divided across competing demands (OECD 2024). Without robust adaptive governance and pre-committed financing mechanisms, both mitigation and long-term adaptation investment risk being deprioritized in favour of immediate crisis response (Bellon and Massetti 2022), reinforcing the same feedback loop set out above, in which insufficient forward-looking adaptation prolongs overshoot (In Focus: Governance, legitimacy and equity).

Temperature reversal, stabilization and navigating permanent change

Declining temperatures will create new adaptation challenges and opportunities. By the time temperatures return to 1.5°C or below, human systems will already have been reshaped, while natural systems may have reorganized or remain in transition. Transformational adaptation under overshoot exceedance, peak and decline pathways must therefore embed flexibility, learning and continual revision of planning baselines

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 86

across all stages. Temperature decline will not simply reverse the warming trajectory. Regional climate responses will remain uneven and non-linear (Pfleiderer, Schleussner and Sillmann 2024; Schleussner *et al.* 2024). Some areas will experience prolonged thermal inertia while others face continued sea-level rise and ocean acidification well after the global mean temperature peak (Fox-Kemper *et al.* 2021). Ecosystems may have reorganized irreversibly, infrastructure may be over-specified or poorly suited to a changing return path and many communities may have already relocated or transformed their livelihoods in response to peak-stage conditions.

The reversal and stabilization stages may themselves become a second source of stress. This stress would be layered onto the accumulated impacts of the exceedance and the peak warming stages. Legacy impacts that do not reverse with temperature—continued sea-level rise, species extinctions, ecosystem regime shifts, permafrost carbon feedbacks and the displacement of communities—mean the post-peak stage inherits the full burden of what preceded it (Turetsky *et al.* 2020; Schleussner *et al.* 2024).

Societies will face the challenge of readjustment. Agricultural systems reconfigured for higher temperatures may need to be readapted, infrastructure designed for hydrological regimes at a peak stage may become mismatched, and communities weakened by decades of escalating crises will face a second transition with diminished institutional and fiscal capacity. These pressures will unfold alongside broader demographic and socioeconomic shifts, including changing population size, age structures and human capital (In Focus: Governance, legitimacy and equity; Lutz 2024).

Re-baselining must be understood as a continuous process, not a discrete event. Central to this are governance questions, spanning formal and informal levels, that current adaptation frameworks and actions do not adequately address: Who decides what gets rebuilt and what gets abandoned? What mechanisms exist for managed retreat from permanently changed landscapes, and who bears the costs? How are livelihoods reconfigured for communities whose economic base has been permanently altered? How are loss and damage addressed for irreversible impacts—including species extinction, cultural losses and permanent displacement—that occurred during the overshoot period? These are questions of justice, power and political legitimacy that require inclusive governance arrangements far beyond what most current adaptation plans envision — including where adaptation ends and Loss and Damage begins. Further, regional heterogeneity in the pace and character of post-peak change reinforces the need for context-specific, locally governed planning rather than any uniform post-peak prescription.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 87

Figure 4.1: Conceptual trajectories of the four key drivers of climate-related risk—hazards, exposure, vulnerability and risks from mitigation responses—along an overshoot, peak and decline pathway

Climate risk will differ, and mostly be higher, in an overshoot world where global warming exceeds 1.5°C and then declines below that level, compared to a world where warming never exceeds 1.5°C

Propeller diagram

Each risk propeller diagram illustrates how climate risk may differ in a 1.5°C world (left side) versus an overshoot world and a world with permanent exceedance (right side).

Drivers of climate risk

The four blades on each side represent the drivers of climate risk:

- Hazard
- Exposure
- Vulnerability
- Responses to climate change

The height of each blade illustrates the contribution of each driver to the overall climate risk.

Overall climate risk

The centre semicircles of each propeller illustrate the overall risk size, resulting from the dynamic interactions among the risk drivers in a 1.5°C world (left side) versus an overshoot world (right side).

1.5°C world

Drivers and overall climate risk in a world that could have been, where the global temperature increase never exceeded 1.5°C above pre-industrial levels (left side).

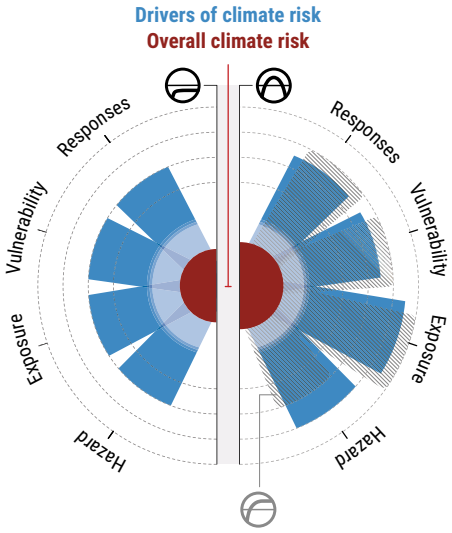
Overshoot world

Drivers and overall climate risk in an overshoot world, where global warming exceeds 1.5°C and then declines below it (right side).

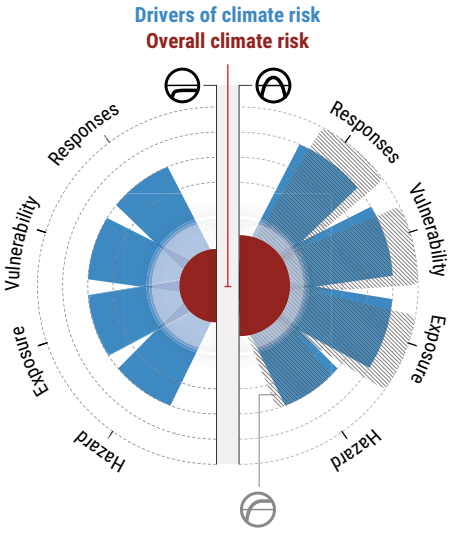
Exceedance world

Drivers of risk in a world where global warming permanently exceeds 1.5°C (right hatched shadows).

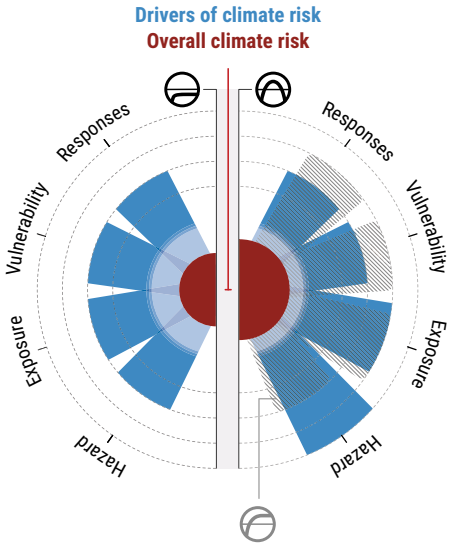
Example a: Malnutrition and rural poverty from extreme drought (increased climate risk in overshoot with partial reversal of hazard and elevated vulnerability)



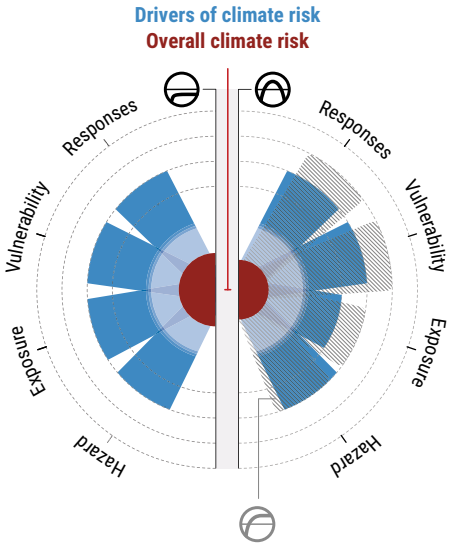
Example b: Coastal erosion and inundation from sea level rise (escalating climate risk in overshoot due to increasingly severe hazard, exposure and vulnerability)



Example c: Ecosystem disturbances intensified by land demand for mitigation (increased climate risk in overshoot due to mitigation compounding vulnerability)



Example d: Mortality from heat waves with effective adaptation measures (reduced climate risk in overshoot due to reversed hazard alongisde effective adaptation)



The four examples of climate risks (a, b, c, d) are not predictions or projections, but conceptual illustrations of how risk could evolve. The data may vary depending on context, like location.

(Source: Reisinger *et al.* 2025)

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 88

Ecosystem-based adaptation under overshoot, peak and decline

The stage logic above plays out differently across sectors. Two examples—ecosystem-based adaptation and infrastructure—show how stage-specific risks translate into concrete planning and design challenges.

Ecosystem-based adaptation is particularly vulnerable to overshoot dynamics. Above 1.5°C some of these measures will reach limits (Chapter 2; IPCC 2022b). For example, the exceedance, peak and decline stages are expected to intensify extreme wildfire activity, drought stress and biome-level vegetation changes, outpacing many existing ecological protections and rendering current approaches insufficient—or even ineffective—without substantial redesign (IPCC 2018a; Anderson *et al.* 2020; Hayman *et al.* 2024). Several ecosystem and biodiversity impacts are already emerging (IPBES 2019; Chapter 2).

Protected areas become critical climate infrastructure. Managing these dynamics requires strengthening and extending the protected area networks that underpin many current ecosystem-based adaptation approaches, and recognizing that these networks serve as critical climate infrastructure (In Focus: Species redistribution and the unmaking of protection). This includes integrating anticipatory, proactive conservation approaches that respond to species redistribution as temperatures rise, peak and eventually decline (D'Aloia *et al.* 2019), and enhancing ecological connectivity across land and sea.

Adaptation will also require smart spatial planning. This planning should anticipate shifting climatic envelopes—and the associated species redistribution, novel community formation and likely biodiversity loss that follow—rather than assuming stationarity or reacting to losses after they occur (Brito-Morales *et al.* 2022; Buenafe *et al.* 2025). Such approaches depend on governance frameworks that explicitly recognize interdependencies among biodiversity, climate and human systems (IPBES 2024a).

Some current adaptation solutions risk becoming maladaptive if not carefully designed. CDR is a case in point: afforestation, BECCS and similar approaches, when implemented in water-limited or naturally open ecosystems, can intensify water stress, displace native biodiversity and alter surface albedo. Large-scale CDR, central to many pathways (Chapter 3), carries trade-offs that remain underexplored and may compete with adaptation needs (Buck *et al.* 2020). For example, afforestation will strain water and land resources (Ricciardi *et al.* 2022; Rosa *et al.* 2021; Deprez *et al.* 2024) and although it could reduce local temperatures (Smith *et al.* 2019b), at the scale required for net-negative emissions, it is likely to compete with agricultural land and threaten food security (Deprez *et al.* 2024). Large-scale BECCS raises parallel concerns, intensifying land-use competition, straining post-peak ecosystem recovery, undermining food security and limiting adaptive capacity (Meyer *et al.* 2022; Meyer and Trisos 2023; Dodds, Vaughan and Hayman 2024). Poorly designed nature-based solutions may likewise harm biodiversity and ecosystem functioning, undermining ecosystem-based adaptation and risking the transgression of adaptation limits (Prütz *et al.* 2026). These risks will likely become more pronounced under high temperature overshoot due to scaling pressures.

Evidence of these risks is already emerging. An analysis of global forest restoration commitments found that, of the 292 million hectares pledged by 43 tropical and sub-tropical countries under the Bonn Challenge and national schemes, 45 per cent are destined for monoculture plantations of fast-growing commercial species such as acacia and eucalyptus, while only 34 per cent are committed to natural forest restoration (Lewis *et al.* 2019). The implications for adaptation and mitigation are substantial: natural forest restoration across the entire pledged area could sequester an estimated 42 billion tons of carbon by 2100, but under these current commitments—where monoculture plantations dominate—this falls to just 16 billion tons, and to a mere 1 billion if planted entirely as commercial monocultures (Lewis *et al.* 2019). Natural forests also store roughly 40 times more carbon than plantations harvested on short rotations, yet in some countries monocultures account for over 80 per cent—and in one case 99 per cent—of

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 89

promised restoration. Beyond the carbon deficit, such plantations can intensify water stress in already water-limited tropical regions (Rosa *et al.* 2021); displace native grasslands, savannahs and forests that support biodiversity and ecosystem function (Veldman *et al.* 2015); and ultimately undermine the very ecosystems on which ecosystem-based adaptation depends — compounding, rather than alleviating, the adaptation challenges intensified by temperature overshoot, peak and decline.

Even well-designed ecosystem-based adaptation faces timing constraints. Many measures require long lead times to mature, while exposure rises rapidly as warming crosses 1.5°C and persists well beyond the peak (Meyer *et al.* 2022). Delayed implementation therefore reduces effectiveness and feasibility, making early action essential to preserve the natural buffers that underpin multi-sector resilience.

Infrastructural dimensions

Infrastructure (formal and informal) faces additional adaptation issues. Infrastructure and buildings have long lifespans, locking-in emissions and resilience outcomes for decades or centuries to come (Frantzeskaki and Loorbach 2010). This means that even decisions taken today will likely be tested across all stages of overshoot. It is therefore vital to recognize that infrastructure decisions could lock in long-term maladaptation or carry high opportunity costs for many years after temperature stabilization. As such, adaptation strategies for infrastructure will need to evolve over time — from anticipatory planning now and during exceedance, to containment and crisis management during peak warming, and eventually toward long-term stewardship under permanently altered climatic and environmental conditions.



Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 90

Table 4.1: Summary of the risks, overarching adaptation philosophy and key adaptation principles for infrastructure and the built environment for stages of overshoot of 1.5°C

Overarching adaptation goal at Exceedance stage:Buy time by absorbing shocks and constraining risks without foreclosing future infrastructure adaptation pathways	
Changing risks to infrastructure and the built environment	**Adaptation principles for infrastructure operators**
Conditions exceed historical norms with increased frequency and with slower recovery increasing damage and disruption to settlements and key infrastructure services such as energy, transport, water, waste management, communications and healthcare. Infrastructure design standards increasingly exceeded.	*Anticipatory adaptation over reactive response* • Shift from historical risk planning to forward-looking stress testing. Adapt before failures become too frequent. *Design margin extension, not optimisation* • Prioritise robustness, safety buffers and tolerance. Accept inefficiency in exchange for reliability and survivability. *No-regret and reversible measures first* • Prioritise actions that reduce exposure and vulnerability, and preserve future flexibility. Avoid capital-intensive fixes that assume a stable climate. *Early identification of irreversible thresholds* • Explicitly map exposure and identify weather (flood, temperature etc.) threshold that provide triggers for adaptation investment. *Keep options open for retreat and reconfiguration* • Begin discussions about potential abandonment *before* crisis forces it.
Overarching adaptation goal at Peak and plateau stage: Normalise infrastructure operation beyond continued exceedance of design limits to prevent cascading failures, sustain existing assets and avoid locking in irreversible future losses	
Changing risks to infrastructure and the built environment	**Adaptation principles for infrastructure operators**
Extreme conditions are persistent and/or overlapping reducing the window for repair; leading to partial, fragile or absent recovery. Design standards are systematically invalid, with infrastructure frequently operating beyond design envelope. High likelihood of rapid crosssector cascading failures (energy–water–Information and Communication Technology [ICT]–health) from compound extreme weather events.	*Safety over performance* Prevent cascading failure even if service quality declines. Prioritise protection of life, health and environmental integrity. *Active triage of infrastructure assets* Avoid implicit abandonment via neglect and explicitly decide what must be protected, what can degrade and what must be lost. *Operate for endurance, not recovery* Design operations to function under chronic loading and stress. Constraining services if necessary, but ensuring a minimum viable service for all. *Minimise additional irreversible damage* Avoid actions that increase contamination; degrade ecosystem function; lock-in maladaptive changes such as stranded assets, sunk costs, and longterm liabilities that constrain future investment. *Reduce system coupling* Decouple energy, water, ICT and transport systems where possible. Contain failures locally instead of allowing cascades. *Legitimate emergency governance with safeguards* Unequal impacts can erode public trust. Transparency and documentation provide accountability to communities for difficult prioritisation decisions to be taken rapidly.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 91

Overarching adaptation goal at Decline stage (postpeak): Transition from reactive endurance operations to long-term stewardship of infrastructure systems that function safely within the permanently altered climate envelope

Changing risks to infrastructure and the built environment	Adaptation principles for infrastructure operators
Impacts remain elevated, but stabilising. Infrastructure systems operating on a new baseline. Some risks are irreversible, including: • Reduced availability of key resources, such as water, food and energy, that are mediated and enabled by infrastructure services. This could have severe consequences for health. • Loss of land—and associated infrastructure and settlements—due to erosion, inundation, exposure or becoming uninhabitable. • Infrastructure assets degraded beyond repair by repeated exceedance of design standards and extreme weather. Ecosystems that support infrastructure through cooling (e.g. data centres and power stations), buffering (e.g. retaining flood water), filtration (e.g. trapping sediments or breaking down pollutants) or protection (e.g. dissipating wave energy or stabilising slopes), cross tipping points.	*Rebaseline, do not restore* Pre-overshoot conditions are no longer valid references, so design standards, safety margins and landuse must all be updated. *Govern irreversible loss explicitly* Manage retreat, abandonment, and compensation deliberately, accepting that some assets, ecosystems and service levels are gone. *Replace emergency fixes with durable solutions* Rapid rebuilds or temporary fixes that become de-facto permanent lock vulnerabilities into the next generation of assets. Avoid accidental and maladaptive permanence by auditing all plateau decisions and stopgaps. Emergency fixes must be reversed, made permanent, relocated, replaced or upgraded. *Adjust service provision to reflect environmental limits* Protect remaining buffering, cooling and filtration capacity of ecosystems. Update infrastructure design standards to reflect new ecological limits. *Institutionalise adaptation and learning* Shift from reactive responses during exceedance and plateau stages, to a culture of long-term stewardship whilst preserving institutional memory of overshoot consequences. *Equitable governance of irreversible post-overshoot losses* Longterm inequities and abandoned areas challenge legitimacy if not explicitly addressed. Distribute burdens and benefits of post-overshoot infrastructure recovery fairly across society and generations.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 92

The following examples show how infrastructure challenges can also present development opportunities at the local and possibly regional scales:

Lock-in climate-positive infrastructure decisions

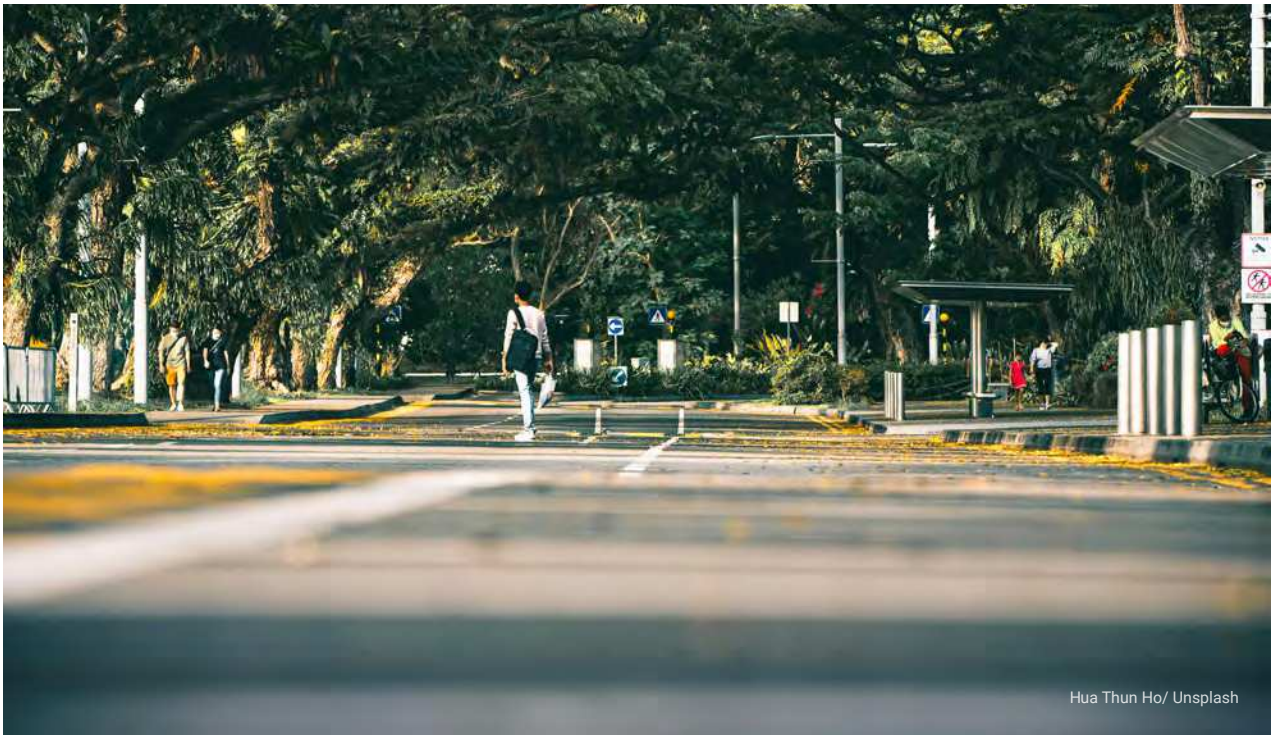
Infrastructure and buildings have long lifespans, locking-in emissions and resilience outcomes for decades or centuries to come (Frantzeskaki and Loorbach 2010). Under an overshoot pathway, adaptation choices should maximise synergies and minimize negative trade-offs between mitigation and adaptation (Ürge-Vorsatz *et al.* 2018). Early investments can reduce current service disruptions and may also reduce higher maintenance costs in the longer term. Improvements made to address peak conditions may therefore reduce risks associated with the exceedance stage while also enhancing pressing current infrastructural and sustainable structural development. However, even if temperatures return to 1.5°C, some sunk costs may be unrecoverable from investments to make infrastructure sufficiently robust to remain resilient against the highest impacts (Meyer and Schwarze 2019).

Irreversible or hard-to-reverse impacts

Exceedance may push long-lived assets such as transport networks, coastal defences and energy systems beyond local adaptation limits (Theokritoff *et al.* 2026). Planners must therefore design now for long-term irreversible changes, even if global warming levels later decline. A flexible pathway approach can help manage uncertainty in the timing and magnitude of exceedance (Haasnoot *et al.* 2021).

Greater strain on water, hydrological and energy systems

Hydrological systems are especially vulnerable because the impacts of overshoot, peak and decline can persist for decades (Marshall, Grubert and Warix 2025). Risks to glacial melt contributions, groundwater dynamics, vegetation-driven hydrological change and water-intensive energy systems may create major supply-demand mismatches (Clason *et al.* 2022; Drenkhan *et al.* 2023). Reduced water availability would also affect the reliability of hydropower, irrigation and other water-dependent services. Even a return below 1.5°C would not reverse centuries-long impacts on glacier mass and runoff (Schuster *et al.* 2025).



Hua Thun Ho/ Unsplash

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 93

Accelerated ecosystem degradation

Natural ecosystems that historically protected or supported infrastructure will degrade under overshoot. Marine heatwaves, ecosystem decline and weakening carbon sinks—all accelerated under warming—undermine coastal protection, drainage systems and flood buffers (Seddon *et al.* 2021). The loss of ecological stability increases the burden on engineered solutions, often at higher costs (Neumann *et al.* 2021). The exposure duration on natural ecosystems may outlast overshoot itself, with some ecological communities never returning to pre-overshoot exposure levels. Large-scale land-based CO_2 removal may further threaten biodiversity (Meyer *et al.* 2022).

Financial and insurance system stress

Exceedance of 1.5°C increases fiscal risks and destabilizes financial mechanisms that underpin infrastructure (Box 2: Debt, insurance and fiscal capacity) As climate risks intensify, the insurability of infrastructure assets could decline. Combined with rising sovereign debt, this limits investments in resilience upgrades or repurposing of infrastructure across all overshoot stages (including the decline stage), thereby threatening the economic viability of infrastructure corridors, housing and utilities (Zenios 2022).

Supply chain and material disruptions

Climate impacts and geopolitical instability are likely to disrupt supply chains for construction materials and energy (Ghadge, Wurtmann and Seuring 2020). Increasing supplier redundancy across regions and climate zones can provide greater resilience to disruptive events (OECD 2024). Some resources used for infrastructure construction to ensure service resilience during overshoot may also prove difficult or impossible to recover afterwards.

Legal, governance and social challenges

Infrastructure is typically a regulated sector. Overshoot exceedance, peak and decline pathways therefore raise legal questions, loss-and-damage responsibilities and equity challenges (Gunda *et al.* 2025). Rapid adaptation demands may exceed institutional capacity, necessitating new mechanisms for infrastructure governance that consider legal dimensions, long-term planning and repurposing of systems during the decline stage (Chester, Miller and Muñoz-Erickson 2020).

Measuring change

Key questions must be continuously reassessed to detect maladaptation risks early: who is involved, what is prioritized, and where and how actions occur (Eriksen *et al.* 2021; Olazabal and Castán Broto 2022; Reckien *et al.* 2023). In practice, current Monitoring, Evaluation and Learning frameworks struggle to capture maladaptation or support adaptive learning (Goodwin and Olazabal 2025) — limitations that will become more consequential and serious under temperature overshoot conditions. Such frameworks must be redesigned to detect maladaptation and respond to these risks, supported by appropriate institutions, finance and expertise (Goodwin and Olazabal 2025; Higuera Roa, Walz and Nehren 2025).

Monitoring gaps also extend upstream of adaptation itself. Effective adaptation depends on future climate projections, yet these remain unavailable or unreliable for many of the most vulnerable and least-resourced nations. A central cause is the sparseness of the historical precipitation and temperature observations that modelling communities require to generate them: across all of Africa, for example, there are only around 200 long-term temperature and 800 monthly rainfall stations, against roughly 5,000 rainfall stations in the United States alone (Williams *et al.* 2024). For small island developing states, the same scarcity constrains projection at the resolution their microclimates and high internal diversity demand (Mycoo *et al.* 2022). In many countries the constraint is not that these records do not exist, but that national data-sharing policies, access costs and limited dissemination keep them from the modelling communities that could use them (Dinku 2019; Lamptey *et al.* 2024). Where observations are genuinely absent, the urgent establishment of systematic data collection is a precondition for the baselines from which any future projections, and therefore any credible adaptation plan, can be built (Lamptey *et al.* 2024).

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 94

4.4 Systemic and transformational adaptation: What considerations are needed for overshoot risk reduction

Incorporating more radical ways of engaging with structures, views and practices, will help to foster and create the forward-looking flexibility needed to manage changing climatic and socioeconomic conditions.

Despite the high stakes and the implications for near-term planning (Fletcher *et al.* 2024; Jones *et al.* 2024; Schleussner *et al.* 2024), there remains a paucity of literature examining how transformational approaches can be considered and implemented, most notably in changed ways of engaging with structures, views and practices (Figure 4.2) (Chapters 2 and 3) (O'Brien 2018; O'Brien 2021b; Vogel and O'Brien 2021; IPBES 2024b).

Urgent action is required, as impacts are already here. At just 1.4°C, warm-water coral reefs are crossing their thermal tipping point, and parts of the polar ice sheets may already have been destabilized (Lenton *et al.* 2025). These findings align with earlier assessments showing that current warming already falls within the lower range of uncertainty for several tipping elements (Armstrong McKay *et al.* 2022). Risks are expected to increase further as warming continues toward an uncertain peak. As shown in other chapters of this report (Chapters 2 and 3) and above, many of the non-linear dynamics, irreversible impacts and planning uncertainties associated with temperature overshoot peak and decline are already emerging under current warming and will accelerate as the world enters the exceedance stage. These dynamics are illustrated for ecosystems and infrastructure in Table 4.1.

Equity considerations are a core element of urgent paradigm shift (Figure 4.2)**.** This shift should begin immediately and unfold through sustained, iterative and participatory processes rather than only rapid, top-down imposition. Attention to distributional dimensions must be central to adaptation and mitigation planning for overshoot pathways, and not treated as equity considerations to be addressed after the primary technical response (Raymond *et al.* 2020a; Birkmann *et al.* 2022; Mycoo *et al.* 2022; O'Neill *et al.* 2022).

Adaptation is complicated by regional differences in warming and cooling rates — including during the decline stage (Chapters 2 and 3). Navigating these pathways, as shown in Table 4.1 and Figure 4.2, requires a continuing and deepening shift away from current, sector specific interventions toward cross-sectoral, more systemic approaches and integrated governance arrangements (In Focus: Governance, legitimacy and equity). Systems-based approaches, linking climate, nature, infrastructure and human well-being, are also critical to more transformational approaches to adaptation (Dawson *et al.* 2018; Dodds, Vaughan and Hayman 2024). 'Nexus governance' or explicitly recognizing the interdependencies across sectors and systems, can also support flexible and integrated decision-making that maximises synergies while minimizing trade-offs (IPBES 2024a).

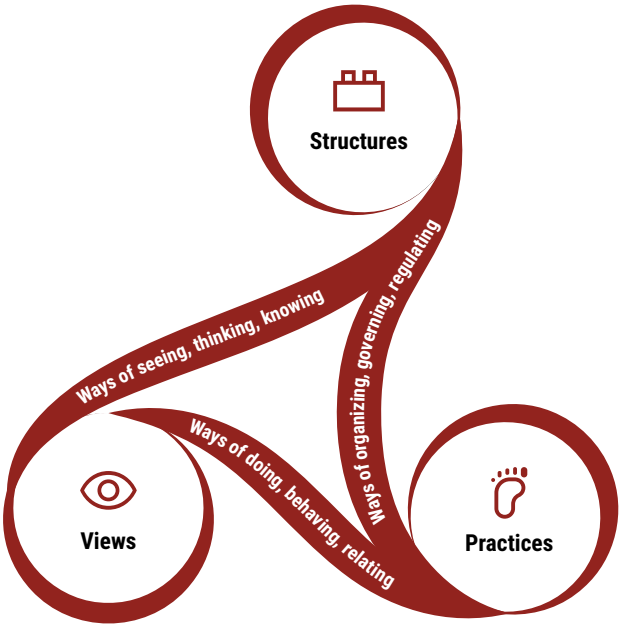
Many planned and established adaptation measures are likely to become infeasible and ineffective as warming intensifies, increasing risks of adaptation limits, tipping dynamics and maladaptation — reinforcing existing, or introduction of new, vulnerabilities and inequities.

One possible way forward is activating a transformational adaptation approach that extends beyond formal governance. Such an approach will require a broader "whole-of-society" perspective (UN 2023; UNDP, Kjellén and Wong 2023; Ruggiero, Piotrowicz and John 2024). O'Brien and Sygna (2013) and O'Brien (2016, 2018, 2021a, 2021b) provide the 'three spheres of transformation'. More recently examples of what transformational ways may include are — the structures (ways of organizing, governing and regulating); views (ways of seeing, thinking and knowing); and practices (ways of doing, behaving and relating) (IPBES 2024b, IPBES 2024c) (Figure 4.2).

These interacting areas of action influence possible adaptation pathways; and should be accounted for in planning and policy processes.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 95

Figure 4.2: Transformational ways of entangled organizing, seeing and doing (all requiring appropriate actions)



Source: IPBES 2024b; IPBES 2024c

Adaptation must span all of society. Adaptation efforts focused only on one area of action —for example, building more resilient infrastructure, deploying better early warning systems, establishing emergency supply chains— will be insufficient if other areas (e.g. ways of governing, regulating and organizing and ways of doing, behaving and relating) remain unchanged. The governance failures, exclusionary decision-making and short-term political horizons that characterize much current adaptation practice will reproduce themselves across each stage of overshoot, peak and decline pathways unless they are explicitly restructured around shared values, perceptions of risk and obligations to future generations (Eriksen, Nightingale and Eakin 2015; Mikulewicz 2020; IPBES 2024a; IPBES 2024b; UNEP 2024a).

New financial and governance frameworks are also likely needed to enable transformation. These may include blended finance and greater private sector engagement alongside public funding, while avoiding cost burdens on developing countries and vulnerable households (UNCTAD 2025; UNEP 2025e; Table 4.1). Finance and governance are, however, not enough. Visionary planning grounded in shared goals for a just and safe future is essential (Figure 4.2) (Colloff *et al.* 2021; Hölscher *et al.* 2022; IPBES 2024b), supported by proactive adaptation and mitigation frameworks that embed ambitious action and iteration as standard practice (Sparkes *et al.* 2023).

Neither frameworks nor vision will move without political will. Political will is a critical determinant of how feasible adaptation, across all levels, can become under overshoot, peak and decline pathways, and is discussed in depth in In Focus: Governance, legitimacy and equity. The persistent gap between adaptation commitments and implementation (UNEP 2024a), and the systematic underestimation of political barriers to adaptation in both research and practice (Javeline 2014; Eriksen, Nightingale and Eakin 2015; Eriksen *et al.* 2021), will be amplified under temperature overshoot, peak and decline conditions. The demands on political commitment will also likely intensify across every stage while the conditions for sustaining it deteriorate — with the greatest consequences for those most exposed to impacts. Increasing pressure on environmental resources and shifting lived experiences may also heighten geopolitical tensions, increase conflict risks and undermine peacebuilding efforts.

A move beyond traditional modelling and scenario thinking can open up new possibilities. Knowledge systems have to evolve to encompass ethical and just negotiations, and the inclusion of thinking drawn from creatives, artists, social media and other communicators (Wyborn *et al.* 2020; Olazabal *et al.* 2024; Brajdić Vuković and Puđak 2026). This can help to answer the question of what an overshoot world could look like.

Inclusive imagining—drawing on cognitive, social processes across disciplines, including the humanities—is an emerging adaptation frontier. It will require new research and action, including 'inclusive' public information and decision-making processes, policy and advocacy alongside careful attention to the agency required at the personal and individual, and practical and wider regional and global political levels (Braun 2015; O'Brien 2018; Moore and Milkoreit 2020; O'Brien 2021a; O'Brien 2021b; Kythreotis *et al.* 2024).

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 96

Many approaches are being designed and tested for current adaptation practices (Marín-Puig, Ariza and Casellas 2022). However, few explicitly address practical guidance for transformational adaptation for the future. Decision trees and adaptive pathways approaches (Haasnoot *et al.* 2013; Denton *et al.* 2014 [AR5 WG2 Chapter 20]; Roy *et al.* 2018 [SR1.5 Chapter 5]) offer one operational framework for structuring choices across the overshoot trajectory, linking specific decision points to monitored indicators and pre-specified trigger conditions. Other work has also begun to measure the contribution of nature-based solutions beyond climate adaptation in cities (Goodwin *et al.* 2024). But far more is needed to support transformational adaptation under overshoot as discussed below.

Such sequencing is less tractable, however, in sectors where development pathways themselves shape which adaptation options remain available, and on what timescale — foreclosing some choices that may be needed later. Complementary approaches drawn from decision-making under deep uncertainty emphasize stress-testing decisions for robustness under multiple climatic and socio-economic futures (Marchau *et al.* 2019), offering a way to navigate trajectories that cannot be fully sequenced in advance.

Even transformational adaptation is bounded. Beyond certain thresholds, reshaping socio-ecological systems would itself impose intolerable and irreversible losses — of sovereignty, ancestral land, culture or self-determination, particularly for small island, coastal and Indigenous communities. Such outcomes are not adaptation but Loss and Damage, a distinct domain tied to compensation, liability and justice (Mechler *et al.* 2020).

Building transformational capacity and planning under deep uncertainty

Act early, evolve and invest. Under deep uncertainty, transformational capacity must begin well before peak warming, evolve across all stages, and be treated as a core adaptation investment rather than an aspirational add-on. This capacity requires institutional learning and rapid unlearning, distributed agency and reflexive governance (Fazey *et al.* 2018; Feindt and Weiland 2018), together with institutions that can uphold long-term goals—including intergenerational justice and ecological integrity—while remaining responsive to rapidly changing conditions. Transformational adaptation will also need to include enabling continuous social learning, empowering actors at multiple scales to exercise adaptive agency and building institutions that can 'hold' long-term goals—including intergenerational justice and ecological integrity—while remaining responsive to the rapidly shifting conditions of each stage. Under deep uncertainty, adaptation planning must try and remain flexible, enabling learning from emerging practices while avoiding lock-in to maladaptive pathways if temperature overshoot, peak and decline proves greater or longer than expected, or overinvestment if it proves smaller or shorter.

Flexible adaptation pathways, if planned for now, can enable sequencing of low-regret, reversible and modular adaptation options rather than committing to a single endpoint (Haasnoot *et al.* 2024). However, this approach is less directly applicable in sectors such as health, where adaptation needs are shaped as much by development trajectories as by physical climate hazards. Closing these gaps will require further intensive research. Priorities include understanding how the solution space for adaptation (Haasnoot *et al.* 2020; Schleussner *et al.* 2024; Reisinger *et al.* 2025) varies across different exceedance levels, peaks and overshoot durations, and how socioeconomic development pathways interact with adaptation across overshoot stages to shape adaptive capacity (Andrijevic *et al.* 2023).

4.5 Synthesis and key take aways for adaptation

This chapter has shown the urgency of effective, efficient, equitable and forward-looking adaptation, including transformational adaptation, to manage overshoot, peak and decline pathways while advancing sustainable development.

Adaptation is not optional: it is essential. Forward-thinking, transformational adaptation, is not merely

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 97

a response to the interactions of climate risks with development pathways, but also a prerequisite for the sustained mitigation that overshoot demands. Without robust adaptive governance and pre-committed financing mechanisms, investments in mitigation and adaptation—across near-term and post-peak horizons—risk being deprioritized in favour of immediate crisis response, a feedback dynamic in which the absence of adaptation extends the duration and magnitude of overshoot itself. Building both adaptation and mitigation capacity depends on enabling conditions that the preceding sections have set out — from political will and finance to equity, justice and attention to loss and damage. These demands only intensify above 1.5°C, amplifying non-linear increases in impacts, compounding their complexity and disproportionately affecting the poor and vulnerable (Chapter 2).

Acting on these messages will be extremely challenging, particularly given the current lack of actionable research on adaptation under overshoot and conditions of deep uncertainty.

Nevertheless, several priorities are clear:

- **Current adaptation implementation efforts remain insufficient in scale, depth and reach, particularly (but not only) for the most vulnerable.** Adaptation approaches are poorly aligned with the realities of an overshoot, peak and decline pathway, and require an urgent paradigm shift to effectively address exceedance — one that begins immediately but unfolds through sustained, iterative and participatory processes rather than rapid imposition. Planning and decision-making must assume that complex and deeply uncertain conditions will continue and may accelerate, emphasizing the need for constant flexibility and continuous learning in design and implementation.
- **Many planned and established measures are likely to become infeasible and ineffective** as temperatures continue to increase and impacts intensify, pushing systems toward soft and hard adaptation limits and increasing the likelihood of crossing critical tipping dynamics associated with exceedance and response actions. Without redesign, current adaptation pathways risk widespread maladaptation and the reinforcement of existing, or introduction of new, vulnerabilities and inequities.
- **Transformational adaptation can no longer be treated in isolation from current development deficits or from singular mitigation efforts.** Transformational adaptation planning and implementation must recognize: opportunities; the constraints and limits to adaptation; and the implications of these for equity and justice along the full overshoot, peak and decline pathway.
- **Political commitment is the critical enabling condition.** Political will—including multilateral political will—is the binding constraint on adaptation under overshoot pathways. The demands on political commitment will intensify across every stage as the conditions for sustaining it deteriorate, with international cooperation least reliable when most needed. The mechanisms that could close this gap—pre-committed finance, durable solidarity arrangements and inclusive governance—must be built well before peak warming, not improvised under crisis conditions.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 98

In Focus: Legal implications of 1.5°C overshoot pathways

The international legal framework for climate mitigation and adaptation is oriented around limiting global warming to 1.5°C, and that benchmark will continue to guide States' obligations if warming exceeds it. The core framework is provided by the UNFCCC and the Paris Agreement, complemented by other treaties including the United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS), as well as customary obligations to prevent significant environmental harm. These obligations are continuing and in important respects are governed by stringent due diligence – a standard which evolves with scientific knowledge and the probability and gravity of foreseeable harm.

An overshoot pathway would not displace this legal framework; it would change only the circumstances in which States must perform their obligations.

Mitigation

In its 2025 advisory opinion on climate change, the International Court of Justice (ICJ) determined that 1.5°C is the "agreed primary temperature goal" of the Paris Agreement parties, citing their decisions reaffirming efforts to limit warming to 1.5°C. The ICJ concluded that parties' NDCs, taken together, must be capable of achieving that goal, and that parties must exercise stringent due diligence in preparing NDCs reflecting their highest possible ambition and in pursuing domestic mitigation measures to achieve them (ICJ 2025). The International Tribunal for the Law of the Sea (ITLOS) similarly tied States' mitigation obligations under UNCLOS to the 1.5°C threshold and the best available science (ITLOS 2024).

Neither advisory opinion expressly addressed the legal implications of overshoot pathways, but their reasoning indicates that overshoot would not alter the legal framework for mitigation. Due diligence evolves with scientific knowledge and the probability and gravity of harm (ITLOS 2024; ICJ 2025). The greater risks of higher and longer overshoot are thus relevant to whether State action is adequate (Rogelj and Rajamani 2025; Rajamani *et al.* 2026). As exceedance increases the probability and gravity of climate harm, due diligence becomes more demanding–especially as temperatures rise above 1.5°C–reinforcing the need for deep, rapid and sustained reductions to limit peak warming and overshoot duration, and continued efforts to return warming below 1.5°C.

All States must exercise stringent due diligence to regulate GHG emissions, including by private actors. The ICJ identified fossil fuel production and consumption, exploration licensing and subsidies as areas in which failure to take appropriate action may constitute an internationally wrongful act. After exceedance, such actions matter most where they lock in emissions or increase reliance on future removals. Differences in responsibility and capability affect the effort required, but they do not excuse feasible action not taken (ITLOS 2024; Mayer 2024; ICJ 2025; Schönfeld and Rogelj 2025; Voigt *et al.* 2025).

The ICJ also found that States must preserve and improve the absorption capacity of carbon reservoirs and sinks. The Court's emphasis on deep emissions reductions, prevention and precaution supports treating CDR as complementary to, not a substitute for, near-term mitigation. CDR also remains subject to legal safeguards concerning biodiversity, the marine environment, human rights and the interests of other States (ICJ 2025; Rajamani *et al.* 2026).

Adaptation

Adaptation obligations gain importance under overshoot pathways. The ICJ concluded that States must undertake adaptation planning and action with due diligence and in light of the best available science (ICJ 2025). This finding supports planning for foreseeable risks at plausible peak warming and for harms that persist after temperatures decline.

States must also cooperate through finance, technology transfer, capacity-building and scientific information. The ICJ recognized that disparities in access to scientific and technical information, particularly for vulnerable developing States, can constrain their ability to assess risks and implement climate obligations (ICJ 2025). UNFCCC, Paris Agreement and UNCLOS obligations on observation, data sharing and capacity-building are especially important in an overshoot context.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 99



© Natalia Mroz / UNEP

In Focus: Governance, legitimacy and equity

The feasibility of mitigation, adaptation and post-peak re-baselining under overshoot pathways depends critically on governance arrangements that are configured for the shape of the overshoot trajectory: front-loading of adaptive investment under current conditions, managing cascading crises at exceedance and peak warming, and contending during the decline period with difficult choices about what gets rebuilt, what is abandoned, and who gains and who bears the costs of permanent change. Governance and institutional arrangements will also need to grapple with the distribution of resources during overshoot, with contexts as diverse as small island states and coastal megacities simultaneously facing the effects of sea-level rise. With limited finances, challenging decisions will need to be made in balancing territorial, financial and moral values for investment and protection. Peak warming will place substantial stress on political and institutional systems, and institutions that fail during this peak period may not fully recover even if climatic conditions later improve (Reisinger *et al.* 2025; Theokritoff *et al.* 2025). The political dynamics through which climate action needs are met have historically been underrepresented in climate assessments as have the ways in which climate impacts interact with distributional tensions, inequality and the risks of armed conflict (Eriksen *et al.* 2021; Leininger *et al.* 2026).

The governance pressures characteristic of overshoot will evolve across its trajectory and the governance task is to maintain capacity that meets the needs of each stage. Under current conditions, the main risk is delayed action and continued distributional inequities. During the exceedance and peak stages, reactive crisis management may crowd out strategic planning and implementation. This may also produce institutional and fiscal constraints under which allocative decisions and absent safeguards tend to reproduce and intensify existing inequalities in wealth and political access. During the decline period, falling global temperatures may weaken political urgency even while harder hit and less well-resourced regions continue to experience both novel and long-duration impacts (Reisinger *et al.* 2025; Theokritoff *et al.* 2025). Institutions capable of maintaining political commitment, fiscal capacity and social legitimacy across these stages are critical; lapses in capability in any one stage may propagate through the others. Adaptive pathways approaches that map the solution space across time and revisit decisions as conditions evolve offer a structured way to address these needs under the deep uncertainty that characterizes overshoot pathways (Haasnoot *et al.* 2024).

Overshoot governance also has a distinctive feature, its self-prolonging dynamic, that sets it apart from general climate governance challenges. During the period of overshoot, there will be an increased need for emergency responses and reconstruction. If meeting these needs diverts fiscal and institutional resources from the sustained mitigation and adaptation on which a Paris-compliant return depends, there is a risk of prolonging the overshoot's severity and duration. Adaptation and mitigation are mutually reinforcing under overshoot: adaptation that reduces vulnerability also reduces future demands placed on reactive and emergency spending; it also preserves the fiscal capacity needed to sustain the steep emissions reductions through net zero and into net negative that bring temperatures back down. Without governance arrangements that protect long-term climate investment during crises, the political conditions that have already produced a period of overshoot may reproduce themselves. Sovereign fiscal space is already constrained by climate-related shocks (Calcaterra *et al.* 2025), adaptation implementation lags commitments under current conditions (UNEP 2024b), and recent stocktakes find adaptation to be largely fragmented, local and incremental rather than transformational (Berrang-Ford *et al.* 2021). These constraints are compounded by the entrenched imbalance between mitigation and adaptation finance, which leaves adaptation chronically under-resourced even in the absence of crisis (Khan *et al.* 2020). Thus, the challenge under overshoot is to insulate mitigation and adaptation from being crowded out by the very dynamics and impacts that characterize the overshoot period.

Loss and damage is the clearest case of a governance architecture that must be capitalised —well before peak warming rather than negotiated under the crisis conditions that may occur at the peak. Strengthening diplomatic mechanisms, climate finance and solidarity arrangements before the onset of overshoot is critical for avoiding fragmentation when those instruments are most needed. Current commitments remain far below projected needs. The Fund for Responding to Loss and Damage, established at COP 27, faces a structural gap between pledged resources (of the order of USD800 million as of late 2025) and current estimates of developing-country needs, which Tavoni *et al.* (2024) place at around USD395 billion for 2025, with an indicative range of USD128 to 937 billion. National engagement with the concept itself is uneven, with different countries advancing distinct framings of what loss and damage covers and what responses it requires (Calliari and Ryder 2023; UNFCCC 2025). Under overshoot, cumulative and irreversible losses will far exceed the capacity of the present architecture.

Overshoot governance challenges unfold across deep prior inequalities and inequities. Distributional and political asymmetries determine how hazards translate into impacts (Eriksen *et al.* 2021; IPCC 2022d). Women, Indigenous Peoples and other historically marginalised groups are often disproportionately exposed because of unequal access to land, resources and political representation. Without action to address differential adaptive capacity and strengthen inclusive institutional capacity, these unequal exposures will persist and even worsen through and after peak warming. Effective national and subnational institutions can substantially reduce mortality from extreme events independent of income, while weak or less inclusive governance compounds inequality (e.g. Tennant and Gilmore 2020). These institutional asymmetries also operate across scales: in Caribbean cities, for example, climate adaptation increasingly devolves to local governments that lack the fiscal authority to act on the scale that sea-level rise demands (Mycoo 2024). In conflict-affected contexts, there is already a pronounced adaptation gap (Sitati *et al.* 2021). Where institutions are already weakened and trust low, even well-designed adaptation interventions can reinforce, redistribute or generate new vulnerabilities (Eriksen *et al.* 2021; Schipper *et al.* 2022).

Cooperation among states under overshoot is similarly conditional. Countries will experience impacts unevenly, with some continuing to face severe, novel or irreversible impacts even after global temperatures begin to decline, reflecting deep differences in geography, natural resource endowments and adaptive capacity. Beyond uneven exposure, the political and economic strains produced by overshoot, including pressure on security expenditure, anti-immigration politics, resource nationalism and elevated instability risks in contexts of pre-existing vulnerability, may further erode the conditions for cooperative response (Mach *et al.* 2019; Buhaug *et al.* 2023). The COVID-19 pandemic provides a cautionary precedent: initial international cooperation gave way to vaccine nationalism, uneven recovery trajectories and a rapid erosion of multilateral commitment once the immediate threat receded in wealthier nations, even as poorer countries continued to bear the burden (Sachs *et al.* 2022; Brown and Rosier 2023). These types of exposure asymmetries and the cooperative stresses they produce could manifest during the decline stage of overshoot: solidarity may erode precisely as the most exposed countries enter their longest exposures.

Under overshoot, mobility and displacement decisions may not reverse with the temperature trajectory: mobility and immobility decisions taken before and during exceedance and peak stages will endure even as temperatures decline. Internal displacement and planned relocation, including managed retreat in highly exposed regions, are already underway, particularly in small island developing states and other low-lying coastal areas, and will intensify as slow-onset processes such as sea-level rise progress (Mach and Siders 2021). The effects of these relocations will persist through and beyond peak warming. At the international level, climate-induced movement is shaped less by hazard exposure than by the broader political, economic and legal conditions that govern migration (Black *et al.* 2011; Cundill *et al.* 2021; Boas *et al.* 2022). Whether migration systems can support mobility as adaptation, whether slow-onset displacement is recognized within existing legal categories, and whether host communities have the capacity to support arrivals are central to addressing these challenges (Cissé *et al.* 2022). Putting the legal, administrative and financial conditions for adaptive mobility in place well before peak warming is therefore central, since the political space to negotiate them narrows during peak. Often overlooked is the further dimension that climate change can reduce mobility for the poorest by destroying the resources that movement requires, leaving populations involuntarily immobile in increasingly hazardous places (Benveniste, Oppenheimer and Fleurbaey 2022).

Ecological recovery operates on timescales that are typically longer than those of temperature decline, and frequently longer than governance, finance and political commitment cycles. Even pathways that return temperature to pre-overshoot levels may durably alter biodiversity, ecosystem function and the services on which mitigation and adaptation depend, with the highest risks in tropical regions including the Amazon, the tropical African coast, and parts of the Indian and Pacific oceans (Meyer *et al.* 2022; Meyer and Trisos 2023). Hysteresis in Atlantic cod stocks illustrates this point: marine species populations can fail to recover even as exploitation pressure declines, with prolonged consequences for the economies that depend on them (Sguotti *et al.* 2019). For fisheries-dependent small island developing states, where local food and economic systems are tightly coupled to marine ecosystem function, this mismatch between recovery timescales can pose substantial health and livelihood issues (Gordon-Strachan *et al.* 2025). Time lags between environmental response and institutional response compound the challenge, often leaving governance arrangements calibrated to conditions that have already passed (Hocherman, Trop and Ghermandi 2025).

The trajectory through and beyond an overshoot, peak and decline pathway is not only a matter of physical temperature pathways: it depends on political choices made before and during the period itself. Investments in preparedness, social protection and institutional resilience prior to peak warming shape whether societies absorb shocks without lasting damage; failure to meet adaptation needs in advance can lock in vulnerability and limit the benefits of subsequent temperature reductions. The capacities that allow the trajectory to bend back, including pre-positioned finance, legitimate and inclusive decision-making, sustained mitigation through net negative, and international cooperation that survives into the decline stage, need to be constructed well before peak; once peak conditions arrive, the political space to construct them narrows. Governance under overshoot is therefore as critical as technical pathways: it is a structural condition for those pathways to remain viable.



© Korn Vitthayanukarun / Vecteezy

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 102

05 Conclusion: Through overshoot and beyond - Risks, choices and frontiers

Overshoot alters the pathway, but not the importance of limiting warming. The evidence assessed in this report indicates that exceedance of 1.5°C is now expected across central estimates, while the precise timing, magnitude and duration remain contingent on future emissions and the response of the climate system (UNEP 2025b; Forster *et al.* 2026; Tavoni *et al.* 2026). Exceedance should not be interpreted as abandonment of the 1.5°C goal, as acceptance of higher warming, or as evidence that action no longer matters. It changes the pathway: from avoiding exceedance altogether to limiting how high and how long temperatures rise above 1.5°C while preserving the possibility of returning below it.

There is no benign overshoot pathway, but its magnitude, duration and consequences are not predetermined. Every fraction of a degree and every year above 1.5°C increases exposure to climate hazards and the likelihood of irreversible loss (IPCC 2022a; Schleussner *et al.* 2024; Reisinger *et al.* 2025). Yet the range of possible outcomes remains wide. Near-term emissions reductions influence peak warming; the level of peak warming influences the scale and feasibility of the net-negative emissions that would be required for temperature decline; and adaptation influences how climate hazards translate into impacts on people, ecosystems and development (IPCC 2021; IPCC 2022b). Choices made before the peak therefore continue to shape conditions long after it.

The central finding is not one of resignation, but of constrained agency. Overshoot narrows options and increases risks, costs and trade-offs. It does not eliminate the ability to limit additional harm. Existing mitigation and adaptation options can slow warming, protect lives and livelihoods, preserve natural carbon stocks and strengthen the institutional capacity needed to sustain action through a prolonged period of exceedance. The challenge is to act while recognizing uncertainty, rather than waiting for uncertainty to disappear.

5.1 Reading of overshoot pathways

Figure 5.1 brings together the report's core insight: mitigation and adaptation must advance throughout the overshoot pathway, even as their contexts and priorities evolve.

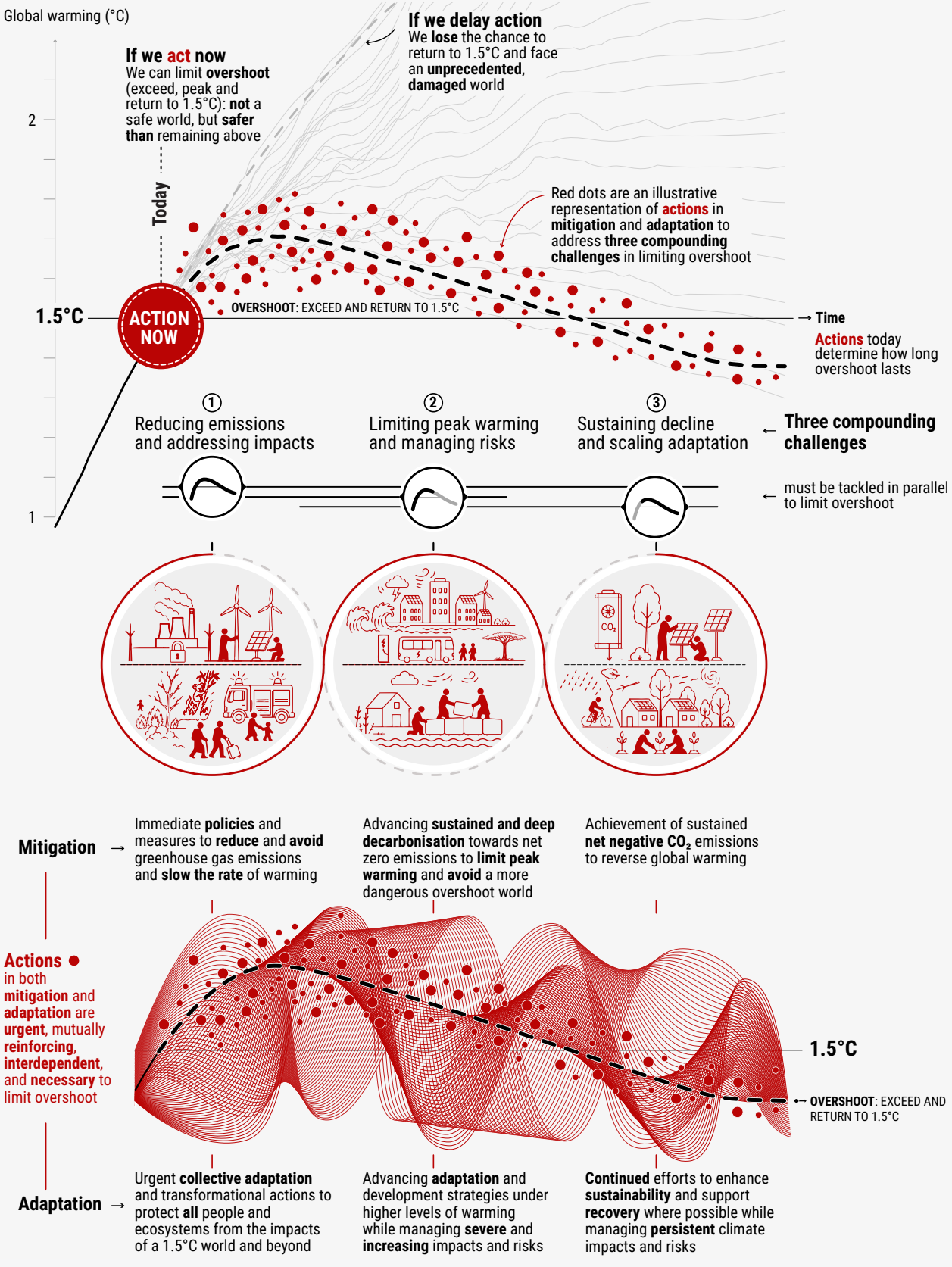
Figure 5.1: Temperature overshoot: actions and challenges (*see next page*)

This is an illustrative depiction of temperature overshoot and the actions and challenges associated with limiting its magnitude, duration and consequences.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 103

TEMPERATURE OVERSHOOT: EXCEED AND RETURN TO 1.5°C

Decades of **insufficient** action have locked us into **three compounding challenges** to limiting **temperature overshoot**, with an **urgent** need for **action** now



© Infodesignlab

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 104

Figure 5.1: Temperature overshoot: actions and challenges (*see previous page*)

In Figure 5.1, the visual features in the **top panel** are indicative and do not represent precise warming magnitudes, rates or probabilities. The black dashed line represents an overshoot pathway adapted from an SSP2-4.5 pathway based on IPCC (2021), while the light grey dashed line represents a high-overshoot pathway adapted from Reisinger *et al.* (2025). The horizontal line marks the 1.5°C global warming level, relative to 1850–1900. The light grey trajectories in the background are illustrative and are informed by visual interpolation across an ensemble of SSP scenarios and tipping-point peaks, depicting a world that may become increasingly challenging depending on the actions we take. The red dots are an illustrative representation of actions in mitigation and adaptation to limit overshoot.

The **middle panel of Figure 5.1**, with its three circular illustrations, conveys three compounding challenges to limiting temperature overshoot: reducing emissions (top half) while addressing current impacts (bottom half); limiting peak warming (top half) while managing escalating risks (bottom half); and sustaining temperature decline (top half) while continuing to adapt to persistent impacts (bottom half). These are not discrete or sequential policy stages. Mitigation and adaptation are required throughout the entire overshoot pathway, although their emphasis and context evolve over time.

In the **lower panel of Figure 5.1**, two interwoven red flows illustrate the interdependence of actions in mitigation and adaptation: rapid emissions reductions limit future warming and reduce dependence on carbon dioxide removal, while adaptation protects people, ecosystems and development as risks intensify and persist.

The central message is that there is no benign overshoot, but neither its magnitude, duration nor consequences are predetermined. Decisions taken today influence how high warming rises above 1.5°C, how long the exceedance lasts, the risks and impacts experienced along the way, and the prospects for a sustained decline in temperature. Limiting overshoot therefore requires mitigation and adaptation to advance together throughout exceedance, peak and decline.

Before and during exceedance, rapid and sustained reductions to GHGs is the most effective way to limit peak warming. Reducing carbon dioxide emissions determines the long-term warming outcome, while deep reductions in methane and other short-lived climate pollutants can slow near-term warming and help limit the peak (IPCC 2021; UNEP 2025c). Avoiding additional emissions also reduces future dependence on carbon dioxide removal and the environmental, social and governance pressures associated with deploying it at large scale (IPCC 2022b; Deprez *et al.* 2024).

At and around peak warming, the task is to halt further warming and sustain societies and ecosystems under the highest level of climate risk. Adaptation limits may be approached or exceeded, fiscal and institutional capacity may be strained by repeated crises, and losses may compound across food, water, health, infrastructure and ecosystems (IPCC 2022b; Reisinger *et al.* 2025). Preventive adaptation and preparedness can reduce these pressures and help preserve the capacity required to maintain mitigation ambition (Aligishiev, Bellon and Massetti 2022; Bellon and Massetti 2022). This mutual dependence is one reason mitigation and adaptation cannot be planned as separate or sequential agendas.

After the peak, temperature decline would require sustained net-negative CO_2 emissions, potentially complemented by further reductions in residual non-CO_2 emissions. Carbon dioxide removal will be needed to counterbalance residual emissions and, at a larger scale, to support temperature decline (IPCC 2021; IPCC 2022b). It is not a substitute for stringent emissions reductions. Its feasible and sustainable contribution depends on the level of residual emissions, the durability of storage, climate feedbacks, resource constraints, governance

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 105

and public legitimacy (Smith *et al.* 2024; Deprez *et al.* 2024; Gidden *et al.* 2026a). Protecting and restoring ecosystems can deliver important benefits, but natural sinks alone are not assessed as sufficient to achieve sustained net-negative emissions at the global scale (Dooley, Nicholls and Meinshausen 2022; Smith *et al.* 2026).

Temperature decline will not reverse all impacts, so adaptation is necessary throughout the pathway. Sea-level rise will continue for centuries; some glacier, ecosystem and biodiversity losses will persist; and societies will have changed through adaptation, displacement, investment and development (Fox-Kemper *et al.* 2021; Meyer and Trisos 2023; Schleussner *et al.* 2024; Schuster *et al.* 2025). The return towards a lower global temperature is therefore not a return to previous climatic, ecological or social conditions. It is a transition into a future shaped by both avoided harm and the legacies of overshoot.

5.2 Decisions under constraint and uncertainty

Irreversible impacts do not make the future inevitable. The extent of additional irreversible loss will depend partly on peak warming and the duration of exceedance, as well as on exposure, vulnerability and adaptive capacity (Meyer and Trisos 2023; Schleussner *et al.* 2024). Action cannot prevent every loss, but it can reduce additional risks and expand the capacity of people and ecosystems to cope, adapt and transform (IPCC 2022b). This distinction is central: acknowledging irreversibility should strengthen risk reduction, not encourage fatalism.

Decision-making must act on what is already well established and anticipate for what remains uncertain. The evidence base is strong on the need for rapid emissions reductions, protection of natural carbon stocks, reductions in methane and other short-lived climate pollutants, and stronger adaptation. Greater uncertainty surrounds the precise peak, the scale and durability of future removals, regional climate conditions during decline, and the responses of ecosystems, economies and societies after the peak. These gaps do not justify delay. They favour decisions that perform across a range of futures, preserve options and can be revised as evidence evolves.

Equity is not an additional consideration applied after the pathway is chosen; it shapes whether the pathway is feasible and legitimate. Countries and communities differ in their historical responsibility, exposure, development needs, fiscal capacity and access to technology and information. The burdens and benefits of emissions reductions, carbon dioxide removal, land-use change, infrastructure protection and adaptation finance will also be unevenly distributed (IPCC 2022b; Deprez *et al.* 2024). Under the UNFCCC principle of common but differentiated responsibilities and respective capabilities, these differences remain central to the distribution of effort and support (Klinsky and Winkler 2018; Fyson *et al.* 2020). Overshoot heightens rather than diminishes their relevance.

Finance must be aligned with the sequence and physical realities of overshoot. It must accelerate near-term emissions reductions—including the deployment of renewable energy, grids and storage—while financing anticipatory and flexible adaptation before worsening impacts lock in vulnerability or divert public resources into repeated crisis response. At the same time, financing for carbon dioxide removal must build a responsible portfolio of approaches without rewarding delayed mitigation or assuming that uncertain future removals will materialize at the required scale, durability and social acceptability. These priorities cannot be pursued sequentially: underinvestment in adaptation can erode the fiscal and political capacity needed to sustain mitigation, while inadequate investment in clean energy increases both peak warming and future dependence on removals. Financing institutions will therefore need to act faster and accept that not every uncertainty can be resolved before investment begins, using staged, modular and revisable approaches that allow learning and adjustment. Speed, however, should not come at the expense of environmental integrity, human rights, equity or community safeguards. Pre-committed financing mechanisms will be needed to protect mitigation and adaptation investment from displacement by escalating crises and sustain action through peak warming and decline.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 106



Governance will have to remain capable of learning while sustaining long-term direction. The pathway from exceedance through peak warming and possible decline extends beyond ordinary political, investment and planning cycles. Institutions will need to interpret evolving evidence, monitor thresholds and implementation, revise baselines and retain legitimacy as priorities change. Agile planning does not mean abandoning long-term goals; it means linking them to observation, review and decision points that allow action to adjust without losing direction (Haasnoot *et al.* 2024; Reisinger *et al.* 2025).

5.3 Frontiers opened by overshoot

The journey to peak warming is better understood than the descent that must follow. Climate science has made substantial advances in understanding warming under rising emissions and the consequences of different global warming levels. Considerably less is known about ecological recovery, regional climate behaviour, social adaptation, economic adjustment and governance during stabilization and decline (Schleussner *et al.* 2024; Reisinger *et al.* 2025). Overshoot therefore opens a frontier that is simultaneously scientific, institutional, political and ethical.

How will regional climates and risks evolve during decline?

A fall in global mean surface temperature may coexist with continued sea-level rise, ocean warming, cryosphere loss and regional changes that differ from those experienced during the warming stage (Fox-Kemper *et al.* 2021; Schleussner *et al.* 2024). Rainfall, drought, extremes and compound hazards may not reverse uniformly or on decision-relevant timescales (Pfleiderer, Schleussner and Sillmann 2024; Douglas *et al.* 2025). Further assessment is needed to understand where declining global temperatures reduce risk, where risks persist and where unfamiliar combinations may emerge. This includes the cumulative exposure created by the magnitude and duration of overshoot—not only the temperature eventually reached.

What can recover, what will reorganize and what will be permanently lost?

The distinction between reversible, partially reversible and irreversible change remains incomplete across Earth system components, ecosystems and human systems. Recovery may be delayed, contingent or impossible; restored temperature conditions may not recreate lost species, cultural practices, livelihoods or ecological relationships. Understanding these differences is necessary both for adaptation and for identifying where impacts move beyond adaptation into loss and damage.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 107

In Focus: Species redistribution and the unmaking of protection

Impacts

Another face of overshoot is the spatial unmaking of nature-conservation institutions. As warming continues, many species tracking their climate envelopes are migrating polewards and upslope. Protected Areas (PAs) cannot follow. Under 2°C, 24 per cent of climates currently within PAs globally are projected to disappear from the existing PA network, 36 per cent of PAs will develop novel climates not previously protected anywhere, and in Africa more than half of PA climate analogues cross national borders (Parks *et al.* 2022).

Impacts are heterogeneous but converging in direction. Half of African mountain plant species are projected to face range contractions under sustainability pathways, rising to three quarters under high-emissions pathways (Vidal Junior *et al.* 2025); upslope climate shifts may reach up to three times the global average — beyond the dispersal capacity of many species. Southern African savannahs and grasslands are undergoing woody plant expansion with cascading effects on rural ecosystem services (Kapuka, Dobor and Hlásny 2022; Trisos *et al.* 2022). In tropical oceans, equatorial species richness has been declining since at least the 1970s while subtropical richness rises (Chaudhary *et al.* 2021), and tropical marine biomass is projected to decline broadly (Lotze *et al.* 2019). These impacts persist well into the decline stage: moved species may not easily return, equatorial losses are irreversible on policy-relevant timescales, and PA designations grow steadily misaligned with their original ecological premise.

Yet PAs are associated with critical ecosystem services, refugia value and biodiversity benefits inside and beyond their boundaries, even as species composition shifts (e.g. Brodie *et al.* 2023). What sustains these services through turnover is, in part, functional redundancy: where multiple species perform similar ecological roles, the loss of any one is partially compensated by others (Oliver *et al.* 2015; IPBES 2019; Biggs *et al.* 2020). Climate-driven compositional change therefore does not, in itself, justify withdrawing area-based protection measures. Where resilience is already eroding, the case is the opposite: for targeted, reinforced protection of those specific functions, not relaxing or removing it. PAs also buffer microclimates relative to surrounding land (Xu *et al.* 2022), making them disproportionately important as refugia. To sustain this function under overshoot will require strengthening area-based conservation, including, where appropriate, through protected areas, other effective area-based conservation measures, Indigenous and traditional territories, buffer zones and greater ecological connectivity (Hannah 2008; Beaumont and Duursma 2012; Laurance *et al.* 2012; Anderson *et al.* 2023).The ICJ's 2025 reaffirmation of UNFCCC and customary obligations to preserve greenhouse gas sinks and reservoirs reinforces this: PAs are climate infrastructure, not only biodiversity infrastructure (ICJ 2025). The ICJ's findings reinforce the need for States to exercise due diligence in conserving and enhancing greenhouse gas sinks and reservoirs, in accordance with applicable international obligations and national circumstances. The question is not whether to sustain the PA network but how to evolve the assumptions on which sustained protection rests — and how to defend it from the new pressures overshoot creates.

Strategic questions

1. Given that the rationale for sustained protection has shifted from static species inventory to ecological function, refugia value and climate infrastructure, how can this re-anchoring be operationalised — in PA design, in implementation across the scope of the Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework's Target 3 and in the alignment of PA networks with identified climate refugia?

2. Overshoot, peak and decline pathways depend on large-scale carbon dioxide removal. How can national and international safeguards ensure that large-scale land-based CDR, including BECCS and afforestation, does not increase pressure on protected and conserved areas or transfer disproportionate land-use burdens to developing regions?

3. Industrial-scale extraction and development is already the leading cause of protected area downgrading, downsizing and degazettement (PADDD), driving most documented events globally and at least 1.2 million km² of marine PADDD alone (Mascia *et al.* 2014; Golden Kroner *et al.* 2019; Albrecht *et al.* 2021). Climate-driven species decline within PAs now creates a new pretext for the same outcome: that since the original species are gone, protection can be relaxed for mining, oil and gas, or other development. The science does not support this — functional redundancy, refugia value, microclimatic buffering and carbon storage all argue for tighter, not looser, protection as overshoot bites. How can safeguards against inappropriate PADDD be strengthened through transparent and participatory reporting and review consistent with the Global Biodiversity Framework and national circumstances, so that climate-driven species loss is not used to justify weakening effective area-based conservation? How can buffer zones and ecological connectivity help sustain the function of national and transboundary conservation networks?

4. What forms of transboundary cooperation will be needed when climate-driven species redistribution moves species into jurisdictions where they were not previously protected?

5. Indigenous Peoples manage or have tenure rights […] over about 40% of all terrestrial protected areas and ecologically intact landscapes" (Garnett *et al.* 2018), often achieving conservation outcomes that match or exceed those under external management (Garnett *et al.* 2018; Dawson *et al.* 2021). As overshoot displaces species and reshapes ecosystems, how can implementation of GBF Target 22 strengthen their rights, authority and resources to adapt their stewardship?

How should adaptation operate in a non-monotonic climate?

Overshoot challenges the adaptation assumption that climate conditions will change progressively in one direction. Infrastructure, agriculture, health systems and ecosystem management may need to function through worsening conditions, an uncertain peak and later regional readjustment (Reisinger *et al.* 2025). Research and practice will need to examine how flexible pathways, modular investment, monitoring and decision triggers can reduce lock-in and maladaptation without postponing action that is already urgent (Haasnoot *et al.* 2024).

How can net-negative emissions be governed without weakening near-term mitigation?

The prospect of temperature decline creates new questions about the scale, timing and allocation of removals; the treatment of residual emissions; the durability and verification of storage; and responsibility for long-term stewardship (Stuart-Smith *et al.* 2023; Edenhofer *et al.* 2025). It also creates a continuing risk of mitigation deterrence if future removals are treated as an alternative to avoiding emissions today. Stronger evidence is needed on sustainable portfolios of carbon dioxide removal, their interaction with adaptation and development, and governance arrangements capable of managing environmental and social trade-offs over long timescales (Deprez *et al.* 2024; Gidden *et al.* 2026a).

What institutions can remain effective and legitimate across generations?

Overshoot, peak and decline could span much of a human lifetime. Responsibilities, capacities, technologies and social priorities will evolve, while the consequences of earlier decisions will persist. This raises unresolved questions about intergenerational responsibility, international cooperation, finance, participation and the governance of permanent change. The challenge is not simply to design institutions for an anticipated future, but to build institutions capable of learning, retaining memory and adapting without shifting burdens onto those least responsible or least able to respond.

What knowledge infrastructure is required to navigate the pathway?

Observation and monitoring are foundational. Detecting changing hazards, approaching thresholds, the performance of adaptation and mitigation measures, and the durability of removals requires sustained and accessible data. Yet major observational and analytical gaps remain, particularly in vulnerable and under-resourced regions. A stronger science–policy interface will depend not only on improved models, but also on the capacity to translate global evidence into locally relevant information and to integrate scientific, Indigenous and local knowledge into decisions.

These uncharted territories should not be mistaken for an absence of direction. The report identifies a substantial body of action that is already supported by evidence. The frontier lies in understanding how to sustain, adjust and govern that action as climate and social conditions evolve. Building this knowledge base is therefore not separate from implementation: monitoring, experimentation, learning and revision are part of navigating overshoot responsibly.

The science–policy interface will also need to become more continuous, two-way and agile. Decision-makers must be able to identify emerging knowledge needs, while researchers, practitioners, practitioners and traditional knowledge holders need channels through which observations and experience can rapidly inform assessment and action. This requires moving beyond periodic transfers of knowledge towards sustained exchange, in which policy questions help shape research and monitoring, and decisions are revisited as evidence and conditions evolve. Greater agility should accelerate learning and adjustment without lowering standards of scientific integrity, transparency or participation.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 109

5.4 Navigating the return to a safer future

Overshoot narrows the space for action, but does not eliminate agency. Rapid and sustained emissions reductions remain the most effective means of limiting peak warming, shortening exceedance and reducing additional climate-related harm (UNEP 2025b; IPCC 2022b). Deep reductions in methane and other short-lived climate pollutants can help slow near-term warming (UNEP 2025c; Shindell *et al.* 2024). Adaptation can protect people, ecosystems and development while preserving the institutional and fiscal capacity needed to sustain mitigation. Carbon dioxide removal will be necessary, but its contribution depends on how far residual emissions are reduced and how responsibly removals can be governed and maintained (Gidden *et al.* 2026a; Tavoni *et al.* 2026).

The path beyond peak warming will not simply retrace the path by which the world arrived there. Regional climates may respond differently; sea levels will continue to rise; some ecosystems will not recover; and societies will have been reshaped by decades of impacts and responses (Meyer and Trisos 2023; Schleussner *et al.* 2024). Navigating that future will require observation, learning and institutions capable of acting under uncertainty while remaining anchored in equity, sustainable development and the long-term temperature goal.

The destination remains a safer climate, but the conditions of the journey are still being shaped. Every fraction of a degree and every year above 1.5°C matters. Decisions taken now will influence how high warming rises, how long exceedance lasts, which losses can still be avoided and the capacities available to future generations beyond the peak. Overshoot is not a reason to lower ambition. It is a reason to act earlier, learn faster and sustain cooperation for longer.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 110

06 Bibliography

Abernethy, S. and Jackson, R.B. (2024). Atmospheric methane removal may reduce climate risks. *Environmental Research Letters*, 19, 051001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad3b22.

Afzal, M.M., Wang, X. and Luo, Y. (2025). Large glaciers sustaining the Upper Indus basin glacier runoff in the future. *Journal of Hydrology,* 657, 132952. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132952.

Albarracín, D., Fayaz-Farkhad, B. and Granados Samayoa, J.A. (2024). Determinants of behaviour and their efficacy as targets of behavioural change interventions. *Nature Reviews Psychology*, 3(6), 377-392. https://doi.org/10.1038/s44159-024-00305-0.

Albrecht, R., Cook, C.N., Andrews, O., Roberts, K.E., Taylor, M.F.J., Mascia, M.B. *et al.* **(2021)**. Protected area downgrading, downsizing, and degazettement (PADDD) in marine protected areas. *Marine Policy*, 129, 104437.https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104437.

Alcántara-Ayala, I. (2025). Cascading hazards and compound disasters. *npj Natural Hazards*, 2, 54. https://doi.org/10.1038/s44304-025-00111-5.

Aligishiev, Z., Massetti, E. and Bellon, M. (2022). Macrofiscal implications of adaptation to climate change. *Staff Climate Notes*, 2022(002). https://doi.org/10.5089/9798400201608.066.

Amorim-Maia, A.T., Anguelovski, I., Chu, E. and Connolly, J. (2022). Intersectional climate justice: A conceptual pathway for bridging adaptation planning, transformative action, and social equity. *Urban Climate*, 41, 101053. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.101053.

Amorim-Maia, A.T. and Olazabal, M. (2025). Beyond adjustment: A new paradigm for climate change adaptation in a complex world. *Global Environmental Change*, 93, 103027. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2025.103027.

An, S.-I., Moon, J.-Y., Dijkstra, H.A., Yang, Y.-M. and Song, H. (2024). Antarctic meltwater reduces the Atlantic meridional overturning circulation through oceanic freshwater transport and atmospheric teleconnections. *Communications Earth & Environment*, 5, 490. https://doi.org/10.1038/s43247-024-01670-7.

Anderson, C.M., Weber, C.L., Fabricius, C., Glew, L., Opperman, J.J., Pacheco, P. *et al.* **(2020)**. Planning for change: Conservation-related impacts of climate overshoot. *BioScience*, 70(2) 115–118. https://doi.org/10.1093/biosci/biz141.

Anderson, M.G., Clark, M., Olivero, A.P., Barnett, A.R., Hall, K.R., Cornett, M.W. *et al.* **(2023)**. A resilient and connected network of sites to sustain biodiversity under a changing climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(7), e2204434119. https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2204434119.

Andreoni, P., Emmerling, J. and Tavoni, M. (2024). Inequality repercussions of financing negative emissions. *Nature Climate Change*, 14(1) 48-54. https://doi.org/10.1038/s41558-023-01870-7.

Andrijevic, M., Schleussner, C.-F., Crespo Cuaresma, J., Lissner, T., Muttarak, R., Riahi, K. *et al.* **(2023)**. Towards scenario representation of adaptive capacity for global climate change assessments. *Nature Climate Change,* 13(8), 778–787. https://doi.org/10.1038/s41558-023-01725-1.

Anguelovski, I., Shi, L., Chu, E., Gallagher, D., Goh, K., Lamb, Z. *et al.* **(2016)**. Equity impacts of urban land use planning for climate adaptation: Critical perspectives from the global North and South. *Journal of Planning Education and Research,* 36(3), 333–348. https://doi.org/10.1177/0739456X16645166.

Armstrong McKay, D.I., Staal, A., Abrams, J.F., Winkelmann, R., Sakschewski, B., Loriani, S. *et al.* **(2022)**. Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, 377(6611), eabn7950. https://www.science.org/doi/10.1126/science.abn7950.

Arrow, K., Cropper, M., Gollier, C., Groom, B., Heal, G., Newell, R. *et al.* **(2013)**. Determining benefits and costs for future generations. *Science*, 341(6144), 349–350. https://doi.org/10.1126/science.1235665.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 111

Babiker, M., Berndes, G., Blok, K., Cohen, B., Cowie, A., Geden, O. *et al.* **(2022)**. Cross-sectoral perspectives. In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Shukla, P.R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., van Diemen, R., McCollum, D. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. 1245-1354. https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2022-mitigation-of-climate-change/crosssectoral-perspectives/0737582AD868A9391148CCE651B68726.

Barrage, L. and Nordhaus, W.D. (2024). Policies, projections, and the social cost of carbon: results from the DICE-2023 model. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 121(13), e2312030121. https://doi.org/10.1073/pnas.2312030121.

Bauer, N., Keller, D.P., Garbe, J., Karstens, K., Piontek, F., von Bloh, W. *et al.* **(2023)**. Exploring risks and benefits of overshooting a 1.5°C carbon budget over space and time. *Environmental Research Letters, 18*(5), 054015. https://doi.org/10.1088/1748-9326/accd83.

Beaumont, L.J. and Duursma, D. (2012). Global projections of 21st century land-use changes in regions adjacent to protected areas. *PLoS ONE*, 7(8), e43714. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043714.

Bednar, J., Obersteiner, M., Baklanov, A., Thomson, M., Wagner, F., Geden, O. *et al.* **(2021)**. Operationalizing the net-negative carbon economy. *Nature*, 596(7872), 377–383. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03723-9.

Bellon, M. and Massetti, E. (2022). *Economic Principles for Integrating Adaptation to Climate Change into Fiscal Policy*. IMF Staff Climate Note 2022/001. International Monetary Fund, Washington, DC. https://www.imf.org/-/media/files/publications/staff-climate-notes/2022/english/clnea2022001.pdf.

Benveniste, H., Oppenheimer, M. and Fleurbaey, M. (2022). Climate change increases resource-constrained international immobility. *Nature Climate Change,* 12(7), 634–641. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01401-w.

Berger, S. and Creutzig, F. (2026). Malleable preferences and the normative desirability of demand-side solutions to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 17*(4), e70079. https://doi.org/10.1002/wcc.70079.

Berrang-Ford, L., Siders, A.R., Lesnikowski, A., Fischer, A.P., Callaghan, M.W., Haddaway, N.R. *et al.* **(2021)**. A systematic global stocktake of evidence on human adaptation to climate change. *Nature Climate Change*, 11(11), 989-1000. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01170-y.

Bertini, L. and Tjiputra, J. (2022). Biogeochemical timescales of climate change onset and recovery in the North Atlantic interior under rapid atmospheric CO_2 forcing. *Journal of Geophysical Research: Oceans,* 127(4), e2021JC017929. https://doi.org/10.1029/2021JC017929.

Bertram, C., Brutschin, E., Drouet, L., Luderer, G., van Ruijven, B., Aleluia Reis, L. *et al.* **(2024)**. Feasibility of peak temperature targets in light of institutional constraints. *Nature Climate Change*, 14(9), 954-960. https://doi.org/10.1038/s41558-024-02073-4.

Bevacqua, E., Schleussner, C.-F. and Zscheischler, J. (2025). A year above 1.5 °C signals that Earth is most probably within the 20-year period that will reach the Paris Agreement limit. *Nature Climate Change*, 15, 262–265. https://doi.org/10.1038/s41558-025-02246-9.

Bezerra, P., da Silva, F., Cruz, T., Mistry, M., Vasquez-Arroyo, E., Magalar, L. *et al.* **(2021)**. Impacts of a warmer world on space cooling demand in Brazilian households. *Energy and Buildings, 234*, 110696. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110696.

Bhatti, N. (2025). The human rights of migrants and refugees in the context of climate-induced displacement. *DME Journal of Law, 6*(2), 62–79. https://www.researchgate.net/publication/402790901.

Biesbroek, R., Engbersen, D., Bonenkamp, J., Broek, E., Boon, E., Meijering, J. *et al.* **(2026)**. Expert agreement on key elements of transformational adaptation to climate risks. *Nature Climate Change,* 16(3), 273–280. https://doi.org/10.1038/s41558-025-02548-y.

Biggs, C.R., Yeager, L.A., Bolser, D.G., Bonsell, C., Dichiera, A.M., Hou, Z. *et al.* **(2020)**. Does functional redundancy affect ecological stability and resilience? A review and meta-analysis. *Ecosphere*, 11(7), e03184. https://doi.org/10.1002/ecs2.3184.

Bijma, J., Pörtner, H.-O., Yesson, C. and Rogers, A.D. (2013). Climate change and the oceans—What does the future hold? *Marine Pollution Bulletin,* 74(2), 495–505. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.022.

Bindl, M., Edwards, M.R. and Cui, R.Y. (2025). Risks of relying on uncertain carbon dioxide removal in climate policy. *Nature Communications*, 16(1), 5958. https://doi.org/10.1038/s41467-025-61106-4.

Birkmann, J., Liwenga, E., Pandey, R., Boyd, E., Djalante, R., Gemenne, F. *et al.* **(2022)**. Poverty, livelihoods and sustainable development. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. 1171-1284.https://doi.org/10.1017/9781009325844.010.

Black, R., Adger, W.N., Arnell, N.W., Dercon, S., Geddes, A. and Thomas, D. (2011). The effect of environmental change on human migration. *Global Environmental Change* 21(Suppl. 1): S3–S11. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.10.001.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 112

Blythe, J., Silver, J., Evans, L., Armitage, D., Bennett, N.J., Moore, M.-L. *et al.* **(2018)**. The dark side of transformation: Latent risks in contemporary sustainability discourse. *Antipode*, 50(5), 1206-1223. https://doi.org/10.1111/anti.12405.

Boas, I., Wiegel, H., Farbotko, C., Warner, J. and Sheller, M. (2022). Climate mobilities: Migration, im/mobilities and mobility regimes in a changing climate. *Journal of Ethnic and Migration Studies,* 48(14), 3365–3379. https://doi.org/10.1080/1369183X.2022.2066264.

Bochow, N., Poltronieri, A., Robinson, A., Montoya, M., Rypdal, M. and Boers, N. (2023). Overshooting the critical threshold for the Greenland ice sheet. *Nature*, 622(7983), 528–536. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06503-9.

Bodansky, D., Brunnée, J. and Rajamani, L. (2017). *International climate change law.* Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/law/9780199664290.001.0001.

Bolton, P., Després, M., Pereira da Silva, L.A., Samama, F. and Svartzman, R. (2020). *The Green Swan: Central Banking and Financial Stability in the Age of Climate Change*. Basel: Bank for International Settlements. https://www.researchgate.net/publication/340578881.

Bonjean Stanton, M.C. and Roelich, K. (2021). Decision making under deep uncertainties: A review of the applicability of methods in practice. *Technological Forecasting and Social Change,* 171, 120939. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120939.

Boulton, C.A., Booth, B.B.B. and Good, P. (2017). Exploring uncertainty of Amazon dieback in a perturbed parameter Earth system ensemble. *Global Change Biology,* 23(12), 5032–5044. https://doi.org/10.1111/gcb.13733.

Bower, E.R., Epifantseva, S., Schmitter, S., Wong-Parodi, G., Kulp, S. and Field, C.B. (2024). Planned relocation may reduce communities' future exposure to coastal inundation but effect varies with emission scenario and geography. *Communications Earth & Environment, 5*, 670. https://doi.org/10.1038/s43247-024-01854-1.

Boyd, P.W., Gattuso, J.-P., Hurd, C.L. and Williamson, P. (2024). Limited understanding of basic ocean processes is hindering progress in marine carbon dioxide removal. *Environmental Research Letters*, 19(6), 061002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad502f.

Boysen, L.R., Lucht, W., Gerten, D., Heck, V., Lenton, T.M. and Schellnhuber, H.J. (2017). The limits to global-warming mitigation by terrestrial carbon removal. *Earth's Future,* 5(5), 463-474. https://doi.org/10.1002/2016EF000469.

Bozec, Y.-M., Adam, A.A.S., Arellano-Nava, B., Cresswell, A.K., Haller-Bull, V., Iwanaga, T. *et al.* **(2025)**. A rapidly closing window for coral persistence under global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 122*(46), e2514519122. https://doi.org/10.1038/s41467-025-65015-4.

Brajdić Vuković, M. and Puđak, J. (2026). Imagining the future after crisis: Science and environmental imaginaries in the Anthropocene. *Journal of Futures Studies*. https://jfsdigital.org/imagining-the-future-after-crisis-science-and-environmental-imaginaries-in-the-anthropocene/.

Braun, B. (2015). Futures: Imagining socioecological transformation—An introduction. *Annals of the Association of American Geographers, 105*(2), 239–243. https://doi.org/10.1080/00045608.2014.1000893.

Brito-Morales, I., Schoeman, D.S., García Molinos, J., Burrows, M.T., Klein, C.J., Arafeh-Dalmau, N. *et al.* **(2020)**. Climate velocity reveals increasing exposure of deep-ocean biodiversity to future warming. *Nature Climate Change, 10*(6), 576–581. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0773-5.

Brito-Morales, I., Schoeman, D.S., Everett, J.D., Klein, C.J., Dunn, D.C., García Molinos, J. *et al.* **(2022)**. Towards climate-smart, three-dimensional protected areas for biodiversity conservation in the high seas. *Nature Climate Change*, 12(4), 402-407. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01323-7.

Brodie, J.F., Mohd-Azlan, J., Chen, C., Wearn, O.R., Deith, M.C.M., Ball, J.G.C. *et al.* **(2023)**. Landscape-scale benefits of protected areas for tropical biodiversity. *Nature*, 620(7975), 807–812. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06410-z.

Brown, S. and Rosier, M. (2023). COVID-19 vaccine apartheid and the failure of global cooperation. *The British Journal of Politics and International Relations*, 25(3), 535–554. https://doi.org/10.1177/13691481231178248.

Brunner, C., Hausfather, Z. and Knutti, R. (2024). Durability of carbon dioxide removal is critical for Paris climate goals. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 645. https://doi.org/10.1038/s43247-024-01808-7.

Buck, H.J., Furhman, J., Morrow, D.R., Sanchez, D.L. and Wang, F.M. (2020). Adaptation and carbon removal. *One Earth*, 3(4), 425–435. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.09.008.

Buenafe, K.C.V., Dunn, D.C., Metaxas, A., Schoeman, D.S., Everett, J.D., Pidd, A. *et al.* **(2025)**. Current approaches and future opportunities for climate-smart protected areas. *Nature Reviews Biodiversity*, 1(5), 284-297. https://doi.org/10.1038/s44358-025-00041-0.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 113

Buhaug, H., Benjaminsen, T.A., Gilmore, E.A. and Hendrix, C.S. (2023). Climate-driven risks to peace over the 21st century. *Climate Risk Management*, 39, 100471. https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100471.

Buma, B., Frumhoff, P.C., Rogers, B.M., Sartzetakis, S., Phillips, C.A., Schädel, C. *et al.* **(2026)**. Policy solutions to better assess progress toward Paris goals given warming-induced ecosystem emissions, which shorten timelines by 2–5 years. *One Earth*. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2025.101571.

Burke, M., Hsiang, S.M. and Miguel, E. (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527(7577), 235-239. https://doi.org/10.1038/nature15725.

Burton, C.A., Kelley, D.I., Burke, E., Mathison, C., Jones, C.D., Betts, R.A. *et al.* **(2024)**. Fire weakens land carbon sinks before 1.5 °C. *Nature Geoscience,* 17. https://doi.org/10.1038/s41561-024-01554-7.

Byers, E., Gidden, M., Leclère, D., Balkovic, J., Burek, P., Ebi, K. *et al.* **(2018)**. Global exposure and vulnerability to multi-sector development and climate change hotspots. *Environmental Research Letters*, 13(5), 055012. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf45.

Byers, E., Krey, V., Kriegler, E., Riahi, K., Schaeffer, R., Kikstra, J. *et al.* **(2022)**. *AR6 Scenarios Database hosted by IIASA*. International Institute for Applied Systems Analysis [IIASA]. https://doi.org/10.5281/zenodo.7197970.

Calcaterra, M., Consiglio, A., Martorana, V., Tavoni, M. and Zenios, S.A. (2025). *Sovereigns on Thinning Ice: Debt Sustainability, Climate Impacts and Adaptation*. Bruegel Working Paper 06/2025. Brussels: Bruegel. Sovereigns on thinning ice: debt sustainability, climate impacts and adaptation. https://www.bruegel.org/working-paper/sovereigns-thinning-ice-debt-sustainability-climate-impacts-and-adaptation.

Calliari, E. and Ryder, B. (2023). What Does Loss and Damage Mean at the Country Level? A Global Mapping Through Nationally Determined Contributions. *Global Environmental Politics*, 23(3), 71–94. https://doi.org/10.1162/glep_a_00725.

Canadell, J.G., Monteiro, P.M.S., Costa, M.H., Cotrim da Cunha, L., Cox, P.M., Eliseev, A.V. *et al.* **(2021)**: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S. *et al.* (eds.). Cambridge and New York: Cambridge University Press. 673–816. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-5/.

Cannon, C., Chu, E., Natekal, A. and Waaland, G. (2023). Translating and embedding equitythinking into climate adaptation: An analysis of US cities. *Regional Environmental Change*, 23, 30. https://doi.org/10.1007/s10113-023-02025-2.

Cao, X., Zhao, Z., Zheng, Y., Su, C., Lei, Q., Li, W. *et al.* **(2025)**. Climate change threatens water resources over the Qinghai–Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 15(1), 21996. https://doi.org/10.1038/s41598-025-05925-x.

Caretta, M.A., Mukherji, A., Arfanuzzaman, M., Betts, R. A., Gelfan, A., Hirabayashi, Y. *et al.* **(2022)**. Water. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* . 551–712. Cambridge: Cambridge University Press. 551-712. https://doi.org/10.1017/9781009325844.006.

Catalano, M., Forni, L. and Pezzolla, E. (2020). Climate-change adaptation: The role of fiscal policy. *Resource and Energy Economics,* 59, 101111. https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2019.07.005.

Chan, T., Mehryar, S., Podestà, M. and Beswick, A. (2026). *Climate change adaptation laws and policies: A review of trends, gaps and opportunities in 35 countries*. Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science. https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/wp-content/uploads/2026/02/Climate-change-adaptation-laws-and-policies.pdf.

Chandler, D.M., Langebroek, P.M., Reese, R., Albrecht, T., Garbe, J. and Winkelmann, R. (2025). Antarctic Ice Sheet tipping in the last 800,000 years warns of future ice loss. *Communications Earth & Environment*, 6, Article 420. https://doi.org/10.1038/s43247-025-02366-2.

Chaudhary, C., Richardson, A.J., Schoeman, D.S. and Costello, M.J. (2021). Global warming is causing a more pronounced dip in marine species richness around the equator. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(15), e2015094118. https://doi.org/10.1073/pnas.2015094118.

Chen, J. and Lin, R. (2024). The impact of climate risks on insurers' profitability: Evidence from China. *Journal of Climate Finance*, 9, 100053. https://doi.org/10.1016/j.jclimf.2024.100053.

Chester, M.V., Miller, T. and Muñoz-Erickson, T.A. (2020). Infrastructure governance for the Anthropocene. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 8(1), 078. https://doi.org/10.1525/elementa.2020.078.

Chimuka, V.R. and Zickfeld, K. (2026). Asymmetry in carbon cycle feedbacks and transient climate response under positive and negative CO2 emissions. *EGUsphere* [preprint], 1-27. https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-6405.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 114

Chopin, T., Costa-Pierce, B.A., Troell, M., Hurd, C.L., Costello, M.J., Backman, S. *et al.* **(2024)**. Deep-ocean seaweed dumping for carbon sequestration: Questionable, risky, and not the best use of valuable biomass. *One Earth, 7*(3), 359–364. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.01.013.

Ciais, P., Zhu, Y., Cai, Y., Lan, X., Michel, S.E., Zheng, B. *et al.* **(2026)**. Why methane surged in the atmosphere during the early 2020s. *Science*, 391(6785), eadx8262. https://doi.org/10.1126/science.adx8262.

Cissé, G., McLeman, R., Adams, H., Aldunce, P., Bowen, K., Campbell-Lendrum, D. *et al.* **(2022)**. Health, wellbeing, and the changing structure of communities. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Pörtner H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. 1041–1170. https://doi.org/10.1017/9781009325844.009.

Clarke, B., Konstantinoudis, G., Barnes, C., Keeping, T., Otto, F., Gasparrini, A. *et al.* **(2025)**. *Climate Change Tripled Heat-Related Deaths in Early Summer European Heatwave*. London: Grantham Institute, Imperial College London. 14 July. https://hdl.handle.net/10044/1/128628.

Clason, C., Rangecroft, S., Owens, P.N., Łokas, E., Baccolo, G., Selmes, N. *et al.* **(2022)**. Contribution of glaciers to water, energy and food security in mountain regions: Current perspectives and future priorities. *Annals of Glaciology*, 63(87-89), 73-78. https://doi.org/10.1017/aog.2023.14.

Climate and Clean Air Coalition [CCAC] and United Nations Environment Programme [UNEP] (2021). *Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions*. Nairobi.

Climate Overshoot Commission (2023). *Reducing the Risks of Climate Overshoot*. https://www.overshootcommission.org/report.

Climate Policy Initiative [CPI] (2026). *Global Landscape of Climate Finance 2026*. Climate Policy Initiative. http://glcf.climatepolicyinitiative.org/.

Collins, W.J., Frame, D.J., Fuglestvedt, J. and Shine, K.P. (2019). Stable climate metrics for emissions of short and long-lived species – combining steps and pulses. *Environmental Research Letters*. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6039.

Colloff, M.J., Gorddard, R., Abel, N., Locatelli, B., Wyborn, C., Butler, J.R.A. *et al.* **(2021)**. Adapting transformation and transforming adaptation to climate change using a pathways approach. *Environmental Science & Policy,* 124, 163–174. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.06.014.

Constable, A.J., Harper, S., Dawson, J., Holsman, K., Mustonen, T., Piepenburg, D. *et al.* **(2022)**. Cross-Chapter Paper 6: Polar regions. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pörtner H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría A. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. 2319–2368. https://doi.org/10.1017/9781009325844.023.

Cook-Patton, S.C., Drever, C.R., Griscom, B.W., Hamrick, K., Hardman, H., Kroeger, T. *et al.* **(2021)**. Protect, manage and then restore lands for climate mitigation. *Nature Climate Change, 11,* 1027–1034. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01198-0.

Copernicus Climate Change Service (2025). *Sea ice cover – February 2025*. https://climate.copernicus.eu/sea-ice-cover-february-2025.

Costello, M.J., Vale, M.M., Kiessling, W., Maharaj, S., Price, J. and Talukdar, G.H. (2022). Cross-Chapter Paper 1: Biodiversity hotspots. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pörtner H.-O., Roberts, D. C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A. *et al.* (eds.) Cambridge: Cambridge University Press. 2123–2161. https://doi.org/10.1017/9781009325844.018.

Coughlan de Perez, E., van den Hurk, B., van Aalst, M.K., Jongman, B., Klose, T. and Suarez, P. (2015). Forecast-based financing: An approach for catalyzing humanitarian action based on extreme weather and climate forecasts. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 15, 895–904*. https://doi.org/10.5194/nhess-15-895-2015.

Coulon, V., Klose, A.K., Edwards, T., Turner, F., Pattyn, F. and Winkelmann, R. (2025). From short-term uncertainties to long-term certainties in the future evolution of the Antarctic Ice Sheet. *Nature Communications*, 16, 10385. https://doi.org/10.1038/s41467-025-66178-w.

Creutzig, F., Roy, J., Devine-Wright, P., Díaz-José, J., Geels, F.W., Grubler, A. *et al.* **(2022)**. Demand, services and social aspects of mitigation. In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Shukla, P.R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., van Diemen, R., McCollum, D. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. 503-612. https://doi.org/10.1017/9781009157926.007.

Creutzig, F., Simões, S.G., Leipold, S., Berrill, P., Azevedo, I., Edelenbosch, O. *et al.* **(2024)**. Demand-side strategies key for mitigating material impacts of energy transitions. *Nature Climate Change*, 14, 561–572. https://doi.org/10.1038/s41558-024-02016-z.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 115

Cronin, J., Anandarajah, G. and Dessens, O. (2018). Climate change impacts on the energy system: A review of trends and gaps. *Climatic Change*, 151, 79–93. https://doi.org/10.1007/s10584-018-2265-4.

Cruz, T., de Moraes Mattos, T., Garcia, B.N., Cretton-Souza, G., Grassi Gonçalves, O., Husadel Poyer, F. *et al.* **(2025)**. How climate change will affect the Brazilian energy system: Evidence from a systematic review. *Annual Review of Environment and Resources*, 50, 1–27. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-111523-102130.

Cui, D., Frazier, A.E., Liang, S., Roehrdanz, P.R., Hurtt, G.C., Zhu, Z. *et al.* **(2025)**. Projected climate zone shifts could undermine the effectiveness of global protected areas for biodiversity conservation by mid-to-late century. *Global Environmental Change Advances, 5*, 100017. https://doi.org/10.1016/j.gecadv.2025.100017.

Cui, M., Ji, D. and Chen, Y. (2025). Permafrost response and feedback under temperature stabilization and overshoot scenarios with different global warming levels. *Earth System Dynamics*, 16(6), 1809-1831. https://doi.org/10.5194/esd-16-1809-2025.

Cundill, G., Singh, C., Adger, W.N., Safra de Campos, R., Vincent, K., Tebboth, M. *et al.* **(2021)**. Toward a climate mobilities research agenda: Intersectionality, immobility, and policy responses. *Global Environmental Change,* 69, Article 102315. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102315.

Cvijanovic, I., Simon, A., Levine, X., White, R., Ortega, P., Donat, M. *et al.* **(2025)**. Arctic sea-ice loss drives a strong regional atmospheric response over the North Pacific and North Atlantic on decadal scales. *Communications Earth & Environment, 6*, 593. https://doi.org/10.1038/s43247-025-02059-w.

D'Aloia, C.C., Naujokaitis-Lewis, I., Blackford, C., Chu, C., Curtis, J.M.R., Darling, E. *et al.* **(2019)**. Coupled networks of permanent protected areas and dynamic conservation areas for biodiversity conservation under climate change. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7, 27. https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00027.

Dawson, N.M., Coolsaet, B., Sterling, E.J., Loveridge, R., Gross-Camp, N.D., Wongbusarakum, S. *et al.* **(2021)**. The role of Indigenous peoples and local communities in effective and equitable conservation. *Ecology and Society*, 26(3), 19. https://doi.org/10.5751/ES-12625-260319.

Dawson, R.J., Thompson, D., Johns, D., Wood, R., Darch, G., Chapman, L. *et al.* **(2018)**. A systems framework for national assessment of climate risks to infrastructure. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2121), 20170298. https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0298.

Day, E., Fankhauser, S., Kingsmill, N., Costa, H. and Mavrogianni, A. (2019). Upholding labour productivity under climate change: An assessment of adaptation options. *Climate Policy*, 19(3), 367–385. https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1517640.

de Vrese, P. and Brovkin, V. (2021). Timescales of the permafrost carbon cycle and legacy effects of temperature overshoot scenarios. *Nature Communications*, 12, 2688. https://doi.org/10.1038/s41467-021-23010-5.

Delval, M.H., Thonemann, N., Henriksson, P.J.G., Tanzer, S.E. and Behrens, P. (2025). Life cycle assessment of ocean-based carbon dioxide removal approaches: A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 224, 116091. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116091.

Denton, F., Wilbanks, T.J., Abeysinghe, A.C., Burton, I., Gao, Q., Lemos, M.C. *et al.* **(2014)**. Climate-resilient pathways: Adaptation, mitigation, and sustainable development. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. 1101-1131. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415379.025.

Deprez, A., Leadley, P., Dooley, K., Williamson, P., Cramer, W., Gattuso, J.-P. *et al.* **(2024)**. Sustainability limits needed for CO_2 removal. *Science*, 383(6682), 484-486. https://doi.org/10.1126/science.adj6171.

Dietz, S., Rising, J., Stoerk, T. and Wagner, G. (2021). Economic impacts of tipping points in the climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118, e2103081118. https://doi.org/10.1073/pnas.2103081118.

Di Fonzo, G. (2025). *Small Island Digital States: Exploring the Relationship Between Digitization, Statehood, and Climate Change-Induced Sea-Level Rise in Tuvalu.* https://mcgill.scholaris.ca/items/cfcd8cdd-8883-4be9-a28a-cb0cfbeb5188?locale=en.

Di Giulio, G.M., Serrao-Neumann, S., Lindoso, D.P., Perez, G.G., Neder, E.A. and Torres, R.R. (2025). Advancing adaptation of highly heterogeneous urban contexts for improved distributive climate justice. *Sustainable Cities and Society*, 130, 106665. https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106665.

Di Leva, C.E. and Pickard, D. (forthcoming 2026). Coordinating to address the "quintessentially universal risk": The role of international organizations in preventing harm from climate change. *International Organizations Law Review*.

Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R.T., Molnár, Z. *et al.* **(2018)**. Assessing nature's contributions to people. *Science, 359*(6373), 270–272. https://doi.org/10.1126/science.aap8826.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 116

Dinh, N.T.T., Tran, J. and Hensher, M. (2024). Measuring and valuing the health co-benefits of climate change mitigation: A scoping review. *The Lancet Planetary Health*, 8(6), e402-e409. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00095-0.

Dinku, T. (2019). Challenges with availability and quality of climate data in Africa. In A. M. Melesse, W. Abtew, and G. Senay (Eds.), *Extreme hydrology and climate variability: Monitoring, modelling, adaptation and mitigation*, 71–80. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00007-5.

Doblas-Reyes, F.J., Sörensson, A.A., Almazroui, M., Dosio, A., Gutowski, W.J., Haarsma, R. *et al.* **(2021)**. Linking global to regional climate change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S. *et al.* (eds.).Cambridge: Cambridge University Press. 1363-1512. https://doi.org/10.1017/9781009157896.012.

Dodds, P.E., Brown, S., Kay, A., Folwell, S., Dalin, C., Calow, R. *et al.* **(2024)**. *Human System Impacts of Overshoot Pathways. Global Consequences of Climate Overshoot Pathways: Annex 6*. London: UK Department for Energy Security and Net Zero. https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/539495.

Dodds, P.E., Vaughan, N. and Hayman, G. (2024). *Global Consequences of Climate Overshoot Pathways: Final Report*. London: UK Department for Energy Security and Net Zero.

Dodman, D., Hayward, B., Pelling, M., Castán Broto, V., Chow, W., Chu, E. *et al.* **(2022)**. Cities, settlements and key infrastructure. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. 907-1040. https://doi.org/10.1017/9781009325844.008.

Dodman, D., Sverdlik, A., Agarwal, S., Kadungure, A., Kothiwal, K., Machemedze, R. *et al.* **(2023)**. Climate change and informal workers: Towards an agenda for research and practice. *Urban Climate*, 48, 101401. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101401.

Doney, S.C., Wolfe, W.H., McKee, D.C. and Fuhrman, J.G. (2025). The science, engineering, and validation of marine carbon dioxide removal and storage. *Annual Review of Marine Science*, 17(1), 55-81. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-040523-014702.

Dooley, K., Nicholls, Z. and Meinshausen, M. (2022). Carbon removals from nature restoration are no substitute for steep emission reductions. *One Earth*. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.06.002.

Douglas, H.C., Revell, L.E., King, A., Harrington, L.J. and Frame, D.J. (2025). *Effects of temperature overshoot amplitude on regional climate*. *Environmental Research Letters, 20*(11), 114043. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ae114f.

Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R.P., Arias, P.A., Barlow, M. *et al.* **(2021)**. Water cycle changes. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. 1055-1210. https://doi.org/10.1017/9781009157896.010.

Drenkhan, F., Buytaert, W., Mackay, J.D., Barrand, N.E., Hannah, D.M. and Huggel, C. (2023). Looking beyond glaciers to understand mountain water security. *Nature Sustainability*, 6(2), 130-138. https://doi.org/10.1038/s41893-022-00996-4.

Drijfhout, S., Angevaare, J.R., Mecking, J., van Westen, R.M. and Rahmstorf, S. (2025). Shutdown of northern Atlantic overturning after 2100 following deep mixing collapse in CMIP6 projections. *Environmental Research Letters*, 20(9), 094062. https://doi.org/10.1088/1748-9326/adfa3b.

Dussaillant, I., Hugonnet, R., Huss, M., Berthier, E., Bannwart, J., Paul, F. *et al.* **(2025)**. Annual mass change of the world's glaciers from 1976 to 2024 by temporal downscaling of satellite data with in situ observations. *Earth System Science Data*, 17(5), 1977-2008. https://doi.org/10.5194/essd-17-1977-2025.

Ebi, K.L., Bowen, K., Haines, A., Hess, J.J., Kovats, R.S. and Woodward, A. (2024). Estimating the total effect of anthropogenic climate change on human health and wellbeing. *Nature Medicine, 30(9), 2392–2393*. https://doi.org/10.1038/s41591-024-03051-1.

Ebi, K.L., Haines, A., Andrade, R.F.S., Åström, C., Barreto, M.L., Bonell, A. *et al.* **(2025)**. The attribution of human health outcomes to climate change: Transdisciplinary practical guidance. *Climatic Change.* https://doi.org/10.1007/s10584-025-03976-7.

Edenhofer, O., Franks, M., Gruner, F., Kalkuhl, M. and Lessmann, K. (2025). The economics of carbon dioxide removal. *Annual Review of Resource Economics*, 17(1), 301-321. https://doi.org/10.1146/annurev-resource-010224-094505.

Edwards, M., Geden, O., Gidden, M., Lamb, W.F., Minx, J., Nemet, G.F. *et al.* **(2026)**. *The State of Carbon Dioxide Removal: 3rd Edition (2026).* Open Science Framework. https://doi.org/10.17605/OSF.IO/ZRD65.

Elmqvist, T., Bai, X., Frantzeskaki, N., Griffith, C., Maddox, D., McPhearson, T. *et al.* **(eds.) (2018)**. *Urban Planet: Knowledge towards Sustainable Cities*. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781316647554.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 117

Engbersen, D., Biesbroek, R. and Termeer, C.J.A.M. (2024). Between theory and action: Assessing the transformative character of climate change adaptation in 51 cases in the Netherlands. *Global Environmental Change*, 89, 102948. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2024.102948.

Eriksen, S.H., Nightingale, A.J. and Eakin, H. (2015). Reframing adaptation: The political nature of climate change adaptation. *Global Environmental Change*, 35, 523-533. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.09.014.

Eriksen, S., Schipper, E.L.F., Scoville-Simonds, M., Vincent, K., Adam, H.N., Brooks, N. *et al.* **(2021)**. Adaptation interventions and their effect on vulnerability in developing countries: Help, hindrance or irrelevance? *World Development*, 141, 105383. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105383.

Esperon-Rodriguez, M., Tjoelker, M.G., Lenoir, J., Baumgartner, J.B., Beaumont, L.J., Nipperess, D.A. *et al.* **(2022)**. Climate change increases global risk to urban forests. *Nature Climate Change, 12*(10), 950–955. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01465-8.

European Environment Agency [EEA] (2025). *Scaling up carbon dioxide removals: Recommendations for navigating opportunities and risks in the EU.* Luxembourg: Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2800/3253650.

Farah, A.A., Mohamed, M.A., Musse, O.S.H. and Nor, B.A. (2025). The multifaceted impact of climate change on agricultural productivity: A systematic literature review of SCOPUS-indexed studies (2015–2024). *Discover Sustainability*, 6, 397. https://doi.org/10.1007/s43621-025-01229-2.

Fazey, I., Schäpke, N., Caniglia, G., Patterson, J., Hultman, J., van Mierlo, B. *et al.* **(2018)**. Ten essentials for action-oriented and second order energy transitions, transformations and climate change research. *Energy Research & Social Science*, 40, 54-70. https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.11.026.

Fazey, I., Schäpke, N., Caniglia, G., Hodgson, A., Kendrick, I., Lyon, C. *et al.* **(2020)**. Transforming knowledge systems for life on Earth: Visions of future systems and how to get there. *Energy Research & Social Science*, 70, 101724. https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101724.

Feindt, P.H. and Weiland, S. (2018). Reflexive governance: Exploring the concept and assessing its critical potential for sustainable development. Introduction to the special issue. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 20(6), 661–674. https://doi.org/10.1080/1523908X.2018.1532562.

Feola, G. (2015). Societal transformation in response to global environmental change: A review of emerging concepts. *Ambio*, 44(5), 376-390. https://doi.org/10.1007/s13280-014-0582-z.

Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L. *et al.* **(eds.)** (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

Filbee-Dexter, K., Pessarrodona, A., Pedersen, M.F., Wernberg, T., Duarte, C.M., Assis, J. *et al.* **(2024)**. Carbon export from seaweed forests to deep ocean sinks. *Nature Geoscience, 17(6), 552–559*. https://doi.org/10.1038/s41561-024-01449-7.

Findlay, H.S., Feely, R.A., Jiang, L.-Q., Pelletier, G. and Bednaršek, N. (2025). Ocean acidification: Another planetary boundary crossed. *Global Change Biology, 31*(6), e70238. https://doi.org/10.1111/gcb.70238.

Fletcher, C., Ripple, W.J., Newsome, T., Barnard, P., Beamer, K., Behl, A. *et al.* **(2024)**. Earth at risk: An urgent call to end the age of destruction and forge a just and sustainable future. *PNAS Nexus*, 3(4), 106. https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgae106.

Flores, B.M., Montoya, E., Sakschewski, B., Nascimento, N., Staal, A., Betts, R.A. *et al.* **(2024)**. Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature, 626(7999), 555–564*. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0.

Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO] (2023a). *Methane emissions in livestock and rice systems: sources, quantification, mitigation and metrics*. Food and Agriculture Organization [FAO]. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cc7607en.

Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO] (2023b). *The Status of Women in Agrifood Systems*. Rome. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cc5343en.

Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO] and World Meteorological Organization [WMOO] (2026). *Extreme heat and agriculture – FAO–WMO joint report*. Rome and Geneva. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd9394en.

Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D. *et al.* **(2021)**. *The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity*. In Climate Change 2021: *The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. 923–1054. https://doi.org/10.1017/9781009157896.009.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 118

Forster, P. M., Smith, C., Walsh, T., Lamb, W. F., Lamboll, R., Cassou, C. *et al.* **(2025)**. Indicators of global climate change 2024: Annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth System Science Data,* 17(6), 2641-2680. https://doi.org/10.5194/essd-17-2641-2025.

Forster, P.M., Walsh, T., Smith, C., Lamb, W.F., Lamboll, R., Cassou, C. *et al.* **(2026)**. Indicators of global climate change 2025: Annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth System Science Data Discussions* [preprint], pp. 1-87. https://doi.org/10.5194/essd-18-3889-2026.

Foster, G. and Rahmstorf, S. (2026). Global warming has accelerated significantly. *Geophysical Research Letters,* 53(X), e2025GL118804. https://doi.org/10.1029/2025GL118804.

Fox-Kemper, B., Hewitt, H.T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S.S., Edwards, T.L. *et al.* **(2021)**. Ocean, cryosphere and sea level change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, pp. 1211–1362. https://doi.org/10.1017/9781009157896.011.

Frantzeskaki, N. and Loorbach, D. (2010). Towards governing infrasystem transitions: Reinforcing lock-in or facilitating change? *Technological Forecasting and Social Change*, 77(8), pp. 1292–1301. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.05.004.

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M.W., Andrew, R.M., Hauuck, J., Landschützer, P. *et al.* **(2025)**. Global carbon budget 2024. *Earth System Science Data Discussions* [preprint], pp. 1-139. https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025.

Fuglestvedt, J., Rogelj, J., Millar, R.J., Allen, M., Boucher, O., Cain, M. *et al.* **(2018)**. Implications of possible interpretations of 'greenhouse gas balance' in the Paris Agreement. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 376(2119), 20160445. https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0445.

Fuhrman, J., Bergero, C., Weber, M., Monteith, S., Wang, F.M., Clarens, A.F. *et al.* **(2023)**. Diverse carbon dioxide removal approaches could reduce impacts on the energy–water–land system. *Nature Climate Change*, 13(4), pp. 341-350. https://doi.org/10.1038/s41558-023-01604-9.

Fuss, S., Johnstone, I., Höglund, R. and Walsh, N. (2024). Chapter 4: The voluntary carbon market. In S. M. Smith *et al.* (Eds.), *The State of Carbon Dioxide Removal 2024* (2nd ed.). https://doi.org/10.17605/OSF.IO/MG3CY.

Fyson, C.L., Baur, S., Gidden, M. and Schleussner, C.-F. (2020). Fair-share carbon dioxide removal increases major emitter responsibility. *Nature Climate Change*, 10(9), pp. 836-841. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0857-2.

Ganti, G., Gasser, T., Bui, M., Geden, O., Lamb, W.F., Minx, J.C. *et al.* **(2024)**. Evaluating the near- and long-term role of carbon dioxide removal in meeting global climate objectives. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 377. https://doi.org/10.1038/s43247-024-01527-z.

Ganti, G., Pelz, S., Klönne, U., Gidden, M.J., Schleussner, C.-F. and Nicholls, Z. (2025). Fair carbon removal obligations under climate response uncertainty. *Climate Policy*, 1-13. https://doi.org/10.1080/14693062.2025.2481138.

Garbe, J., Albrecht, T., Levermann, A., Donges, J.F. and Winkelmann, R. (2020). The hysteresis of the Antarctic Ice Sheet. *Nature*, 585(7826), pp. 538–544. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2727-5.

Garcia, A. and Tschakert, P. (2022). Intersectional subjectivities and climate change adaptation: An attentive analytical approach for examining power, emancipatory processes, and transformation. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 47(3), pp. 651–665. https://doi.org/10.1111/tran.12529.

Garnett, S.T., Burgess, N.D., Fa, J.E., Fernández-Llamazares, Á., Molnár, Z., Robinson, C.J. *et al.* **(2018)**. A spatial overview of the global importance of Indigenous lands for conservation. *Nature Sustainability*, 1(7), pp. 369–374. https://doi.org/10.1038/s41893-018-0100-6.

Gasparrini, A., Guo, Y., Sera, F., Vicedo-Cabrera, A.M., Huber, V., Tong, S. *et al.* **(2017)**. Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. *The Lancet Planetary Health*, 1(9), e360-e367. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30156-0.

Geden, O. and Reisinger, A. (2025) *Overshoot: Returning to 1.5°C requires net-negative emissions targets*. SWP Comment No. 47/2025. Berlin: Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP). https://doi.org/10.18449/2025C47.

Gernaat, D.E.H.J., de Boer, H.S., Daioglou, V., Yalew, S.G., Müller, C. and van Vuuren, D.P. (2021). Climate change impacts on renewable energy supply. *Nature Climate Change*, 11(2), pp. 119–125. https://doi.org/10.1038/s41558-020-00949-9.

Ghadge, A., Wurtmann, H. and Seuring, S. (2020). Managing climate change risks in global supply chains: A review and research agenda. *International Journal of Production Research*, 58(1), pp. 44-64. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1629670.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 119

Gidden, M.J., Brutschin, E., Ganti, G., Unlu, G., Zakeri, B., Fricko, O. *et al.* **(2023)**. Fairness and feasibility in deep mitigation pathways with novel carbon dioxide removal considering institutional capacity to mitigate. *Environmental Research Letters*, 18(7), 074006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/acd8d5.

Gidden, M.J., Joshi, S., Armitage, J.J., Christ, A.-B., Boettcher, M., Brutschin, E. *et al.* **(2025)**. A prudent planetary limit for geologic carbon storage. *Nature*, 645(8079), pp. 124-132. https://doi.org/10.1038/s41586-025-09423-y.

Gidden, M.J., Portugal-Pereira, J., Apeaning, R., Bergero, V., Daioglou, V., Drouet, L. *et al.*. **(2026a)**. Chapter 8: Paris-consistent CDR scenarios. In: Edwards, M.R. *et al.* (eds.) *The State of Carbon Dioxide Removal 3rd Edition 2026*. https://doi.org/10.17605/OSF.IO/JZDQM.

Gidden, M.J., Ganti, G., Lamb, W.F., Reisinger, A. and Rekker, S. (2026b). Responsibility for emissions and mitigation capability should guide use of carbon removal offsets. *One Earth*, 9(3). https://doi.org/10.1016/j.oneear.2026.101654.

Giguere, J., Otto, F., Tannenbaum, A., Vahlberg, M., Arrighi, J, Dahl, K. *et al.* **(2025)**. *Climate Change and the Escalation of Global Extreme Heat: Assessing and Addressing the Risks*. Climate Central, Red Cross Red Crescent Climate Centre and World Weather Attribution. https://www.climatecentral.org/report/climate-change-and-the-escalation-of-global-extreme-heat-2025

Gilmore, E.A., Kousky, C. and St. Clair, T. (2022). Climate change will increase local government fiscal stress in the United States. *Nature Climate Change* 12, pp. 216–218. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01311-x.

Global Center on Adaptation [GCA] (2025). *State and Trends in Adaptation 2025: Small Island Developing States*. Rotterdam: Global Center on Adaptation. https://gca.org/reports/sta25/.

Goeking, S.A. and Tarboton, D.G. (2020). Forests and water yield: A synthesis of disturbance effects on streamflow and snowpack in western coniferous forests. *Journal of Forestry*, 118(2), pp. 172-192. https://doi.org/10.1093/jofore/fvz069.

Golden Kroner, R.E., Qin, S., Cook, C.N., Krithivasan, R., Pack, S.M., Bonilla, O.D. *et al.* **(2019)**. The uncertain future of protected lands and waters. *Science*, 364(6443), pp. 881–886. https://doi.org/10.1126/science.aau5525.

Goodwin, S., Olazabal, M., Castro, A.J. and Pascual, U. (2024). Measuring the contribution of nature-based solutions beyond climate adaptation in cities. *Global Environmental Change,* 89, Article 102939. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2024.102939.

Goodwin, S. and Olazabal, M. (2025). Revisiting the challenges to monitoring, evaluation, reporting, and learning for climate adaptation. *Environmental Science & Policy*, 172, 104199. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2025.104199.

Göpel, M. (2016). *The Great Mindshift: How a New Economic Paradigm and Sustainability Transformations Go Hand in Hand*. The Anthropocene: Politik—Economics—Society—Science. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43766-8

Gordon-Strachan, G.M., Parker, S.Y., Harewood, H.C., Méndez-Lázaro, P.A, Saketa, S.T., Parchment, K.F. *et al.* **(2025)**. The 2024 small island developing states report of the Lancet Countdown on health and climate change. *The Lancet Global Health* 13(1): e146–e166.

Grafakos, S., Viero, G., Reckien, D., Trigg, K., Viguié, V., Sudmant, A. *et al.* **(2020)**. Integration of mitigation and adaptation in urban climate change action plans in Europe: A systematic assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121, 109623. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109623.

Grant, L., Vanderkelen, I., Gudmundsson, L., Fischer, E., Seneviratne, S.I. and Thiery, W. (2025a). Global emergence of unprecedented lifetime exposure to climate extremes. *Nature*, 641(8062), pp. 374-379. https://doi.org/10.1038/s41586-025-08907-1.

Grant, N., Forner, C., Geffray, M.-C., Hare, B., Khan, Z., Welder, L. *et al.* **(2025b)**. *Rescuing 1.5°C: New evidence on highest possible ambition to deliver the Paris Agreement*. Climate Analytics & Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). https://publications.pik-potsdam.de/pubman/item/item_33557_1/component/file_33558/Rescuing1.5%C2%BAC.pdf.

Grosselindemann, H., Burger, F.A. and Frölicher, T.L. (2026). The efficiency and ocean acidification mitigation potential of ocean alkalinity enhancement on multi-centennial timescales. *Biogeosciences* 23, pp. 3299–3321. https://doi.org/10.5194/bg-23-3299-2026.

Grubert, E. and Marshall, A. (2022). Water for energy: Characterizing co-evolving energy and water systems under twin climate and energy system nonstationarities. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 9(2), e1576. https://doi.org/10.1002/wat2.1576.

Gunda, T., Wachtel, A., Khadka Mishra, S. and Moog, E. (2025). Quantitative approaches for including equity in risk and resilience infrastructure planning analyses. *Risk Analysis*, 45(11), pp. 3427-3438. https://doi.org/10.1111/risa.14230.

Haasnoot, M., Kwakkel, J.H., Walker, W.E. and ter Maat, J. (2013). Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change*, 23(2), pp. 485-498. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 120

Haasnoot, M., Biesbroek, R., Lawrence, J., Muccione, V., Lempert, R.J. and Glavovic, B. (2020). Defining the solution space to accelerate climate change adaptation. *Regional Environmental Change*, 20(2), 37. https://doi.org/10.1007/s10113-020-01623-8.

Haasnoot, M., Winter, G., Brown, S., Dawson, R.J., Ward, P.J. and Eilander, D. (2021). Long-term sea-level rise necessitates a commitment to adaptation: A first order assessment. *Climate Risk Management*, 34, 100355. https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100355.

Haasnoot, M., Di Fant, V., Kwakkel, J. and Lawrence, J. (2024). Lessons from a decade of adaptive pathways studies for climate adaptation. *Global Environmental Change*, 88, 102907. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2024.102907.

Hallegatte, S., Shah, A., Lempert, R., Brown, C. and Gill, S. (2012). Investment decision making under deep uncertainty: application to climate change. *World Bank Policy Research Working Paper*, No. 6193. Washington, DC: World Bank. https://doi.org/10.1596/1813-9450-6193.

Hallegatte, S., Rentschler, J. and Rozenberg, J. (2019). *Lifelines: The Resilient Infrastructure Opportunity*. Sustainable Infrastructure Series. Washington, DC: World Bank. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/31805.

Hannah, L. (2008). Protected areas and climate change. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134, pp. 201–212. https://doi.org/10.1196/annals.1439.009.

Harris, R.M.B., Beaumont, L.J., Vance, T.R., Tozer, C.R., Remenyi, T.A., Perkins-Kirkpatrick, S.E. *et al.* **(2018)**. Biological responses to the press and pulse of climate trends and extreme events. *Nature Climate Change*, 8(7), pp. 579–587. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0187-9.

Hay, S., Blockley, E., Catto, J., Hewitt, H., Eunice Lo, Y.T., Screen, J.A. *et al.* **(2025)**. The impact of Arctic sea-ice loss on winter weather in the British Isles. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Advance online publication. https://doi.org/10.1002/qj.70012.

Hayek, M.N., Harwatt, H., Ripple, W.J. and Mueller, N.D. (2020). The carbon opportunity cost of animal-sourced food production on land. *Nature Sustainability* 4:21–24. https://doi.org/10.1038/s41893-020-00603-4.

Hayman, G., Huntingford, C., Kelley, D., Price, J., Jevrejeva, S., Jacobs, Z. *et al.* **(2024)**. *Natural System Impacts of Overshoot Pathways. Global Consequences of Climate Overshoot Pathways – Annex 5*. London: UK Department for Energy Security and Net Zero. https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/539487/.

Hemmati, M., Gray, I.P. and Bowen, S.G. (2025). The growing void in the U.S. homeowners insurance market: who should bear the rising cost of climate change? *npj Climate Action* 4, 35. https://doi.org/10.1038/s44168-025-00231-8

Hermans, K., Djanibekov, N., Abdullaev, I., Abduvalieva, N., Assubayeva, A., Blondin, S. *et al.* **(2025)**. Future research directions for understanding the interconnections between climate change, water scarcity, and mobility in rural Central Asia. *Climate and Development, 17*(7), pp. 638–647. https://doi.org/10.1080/17565529.2024.2436090.

Heuzé, C. and Jahn, A. (2024). The first ice-free day in the Arctic Ocean could occur before 2030. *Nature Communications*, 15, Article 10682. https://doi.org/10.1038/s41467-024-54508-3.

Higuera Roa, O., Walz, Y. and Nehren, U. (2025). How to avoid the risk of maladaptation? From a conceptual understanding to a systematic approach for analyzing potential adverse effects in adaptation actions. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 30*(4), 27. https://doi.org/10.1007/s11027-025-10217-w.

Hino, M., Field, C.B. and Mach, K.J. (2017). Managed retreat as a response to natural hazard risk. *Nature Climate Change*, 7(5), pp. 364-370. https://doi.org/10.1038/nclimate3252.

Hocherman, T., Trop, T. and Ghermandi, A. (2025). Time lags in environmental governance: A critical review. *Ambio* 54(12): 2042–2059. https://doi.org/10.1007/s13280-025-02211-y.

Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I. *et al.* **(2018)**. Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems. In *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, pp. 175–312. https://doi.org/10.1017/9781009157940.005.

Höglund-Isaksson, L., Gómez-Sanabria, A., Klimont, Z., Rafaj, P. and Schöpp, W. (2020). Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe—Results from the GAINS model. *Environmental Research Communications*, 2(2), 025004. https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab7457.

Hölscher, K., Frantzeskaki, N., Jäger, J., Holman, I. and Pedde, S. (2022). Co-producing transformative visions for Europe in 2100: A multi-scale approach to orientate transformations under climate change. *Futures*, 143, 103025. https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.103025.

Holt, J., Katavouta, A., Hopkins, J., Amoudry, L.O., Appendini, C.M., Arneborg, L. *et al.* **(2025)**. Future climate projections in the global coastal ocean. *Progress in Oceanography, 244*, 103497. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2025.103497.

Honegger, M. (2023). Toward the effective and fair funding of CO_2 removal technologies. *Nature Communications*, 14(1), 534. https://doi.org/10.1038/s41467-023-36199-4.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 121

Höning, D., Willeit, M., Calov, R., Klemann, V., Bagge, M. and Ganopolski, A. (2023). Multistability and transient response of the Greenland Ice Sheet to anthropogenic CO_2 emissions. *Geophysical Research Letters*, 50(7), e2022GL101827. https://doi.org/10.1029/2022GL101827.

Höning, D., Willeit, M. and Ganopolski, A. (2024). *Reversibility of Greenland ice sheet mass loss under artificial carbon dioxide removal scenarios*. *Environmental Research Letters, 19*(2), 024038. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad2129.

Hooijschuur, E., Vrontisi, Z., Ali Abdallah, R., Angelkorte, G., Baptista, L.B., Daskalaki, V. *et al.* **(2025)**. *Development of Global and National Climate Policy Pathways*. https://doi.org/10.5281/zenodo.15655308.

Humpenöder, F., Popp, A., Merfort, L., Luderer, G., Weindl, I., Bodirsky, B.L. *et al.* **(2024)**. Food matters: Dietary shifts increase the feasibility of 1.5°C pathways in line with the Paris Agreement. *Science Advances, 10*(5), eadj3832. https://doi.org/10.1126/sciadv.adj3832.

Huntingford, C. (2026). Robust projections of risks to the Amazon rainforest. *Nature*, 654, pp. 37–38. https://doi.org/10.1038/d41586-026-01158-8.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Meyer, L.A. (eds.). Geneva: IPCC.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2018a). *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty.* Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/sr15/.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2018b). Annex I: Glossary. Matthews, J.B.R. (ed.). In *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press.541–562. https://doi.org/10.1017/9781009157940.008.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2019). Summary for Policymakers. In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press.. 3–35. https://doi.org/10.1017/9781009157964.001.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2021). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. 3–32. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers/.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2022a). Annex I: Glossary. van Diemen, R. (ed.). In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Shukla, P.R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., van Diemen, R., McCollum, D. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press.1793–1820. https://doi.org/10.1017/9781009157926.020.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2022b). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Shukla, P.R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., van Diemen, R., McCollum, D. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. 3–48. https://doi.org/10.1017/9781009157926.001.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2022c). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009325844.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2022d). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press.3–33. https://doi.org/10.1017/9781009325844.001.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2022e). Annex II: Glossary. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Möller, V., van Diemen, R., Matthews, J.B.R., Méndez, C., Semenov, S., Fuglestvedt, J.S. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. 2897–2930. https://doi.org/10.1017/9781009325844.029.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2023a). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Lee, H. and Romero, J. (eds.). Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 122

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2023b). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Lee, H. and Romero, J. (eds.). Geneva: IPCC. 1–34. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [IPBES] (2019). *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Brondízio, E.S., Settele, J., Díaz, S. and Ngo, H.T. (eds.). Bonn: IPBES Secretariat. https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673.

Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [IPBES] (2024a). *Thematic Assessment Report on the Interlinkages among Biodiversity, Water, Food and Health*. Harrison, P. A., McElwee, P. D. and van Huysen, T. L. (eds.). Bonn: IPBES Secretariat. https://doi.org/10.5281/zenodo.13850054.

Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [IPBES] (2024b). *Summary for policymakers of the thematic assessment report on the underlying causes of biodiversity loss and the determinants of transformative change and options for achieving the 2050 Vision for Biodiversity of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. O'Brien, K., Garibaldi, L., Agrawal, A., Bennett, E., Biggs, O., Calderón Contreras, R. *et al.* (Eds.). Bonn: IPBES Secretariat. https://doi.org/10.5281/zenodo.11382230.

Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [IPBES] (2024c). *Thematic Assessment Report on the Underlying Causes of Biodiversity Loss and the Determinants of Transformative Change and Options for Achieving the 2050 Vision for Biodiversity of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (Transformative Change Assessment)*. O'Brien, K., Garibaldi, L., and Agrawal, A. (eds.). Bonn: IPBES secretariat. https://doi.org/10.5281/zenodo.11382215.

International Court of Justice [ICJ] (2025). *Obligations of States in Respect of Climate Change*. Advisory Opinion. 23 July. https://www.icj-cij.org/sites/default/files/case-related/187/187-20250723-adv-01-00-en.pdf.

International Energy Agency [IEA] (2025). *The State of Energy Innovation 2025*. Paris: International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/the-state-of-energy-innovation-2025

International Tribunal for the Law of the Sea (2024). *Request for an advisory opinion submitted by the Commission of Small Island States on Climate Change and International Law: Advisory opinion, Case No. 31, 21 May 2024*. International Tribunal for the Law of the Sea. https://www.itlos.org/fileadmin/itlos/documents/cases/31/Advisory_Opinion/C31_Adv_Op_21.05.2024_orig.pdf.

Islam, M.M. and Fraser, E.D.G. (2026). Climate-resilient agri-food systems (CRAFS): A review of approaches and outcomes of agri-food systems. *Sustainable Development*. Advance online publication. https://doi.org/10.1002/sd.71263.

Iungman, T., Cirach, M., Marando, F., Pereira Barboza, E., Khomenko, S., Masselot, P. *et al.* **(2023)**. Cooling cities through urban green infrastructure: A health impact assessment of European cities. *The Lancet, 401*(10376), 577–589. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)02585-5.

Iyer, G., Ou, Y., Edmonds, J., Fawcett, A.A., Hultman, N., McFarland, J. *et al.* **(2022)**. Ratcheting of climate pledges needed to limit peak global warming. *Nature Climate Change*, 12, 1129–1135. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01508-0.

Vanos J., Guzman-Echavarria, G., Baldwin, J.W., Bongers, C., Ebi, K.L. and Jay, O. (2023). A physiological approach for assessing human survivability and liveability to heat in a changing climate. *Nature Communications*, 14, 7653. https://doi.org/10.1038/s41467-023-43121-5.

Jäger, F., Schwaab, J., Quilcaille, Y., Windisch, M., Doelman, J., Frank, S. *et al.* **(2024)**. Fire weather compromises forestation-reliant climate mitigation pathways. *Earth System Dynamics*, 15(4), 1055–1071. https://doi.org/10.5194/esd-15-1055-2024.

Jahn, A., Holland, M.M. and Kay, J.E. (2024). Projections of an ice-free Arctic Ocean. *Nature Reviews Earth & Environment, 5*(3), 164–176. https://doi.org/10.1038/s43017-023-00515-9

Jaramillo, P., Kahn Ribeiro, S., Newman, P., Dhar, S., Diemuodeke, O.E., Kajino, T. *et al.* **(2022)**. Transport. In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Shukla, P.R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., van Diemen, R., McCollum, D. *et al.* (eds.). Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press. Chapter 10. https://doi.org/10.1017/9781009157926.012.

Javeline, D. (2014). The most important topic political scientists are not studying: Adapting to climate change. *Perspectives on Politics*, 12(2), 420-434. https://doi.org/10.1017/S1537592714000784.

Jeltsch-Thömmes, A., Tran, G., Lienert, S., Keller, D.P., Oschlies, A. and Joos, F. (2024). Earth system responses to carbon dioxide removal as exemplified by ocean alkalinity enhancement: tradeoffs and lags. *Environmental Research Letters,* 19 (5). https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad4401.

Jiang, L.-Q., Dunne, J., Carter, B.R., Tjiputra, J.F., Terhaar, J., Sharp, J.D. *et al.* **(2023)**. Global surface ocean acidification indicators from 1750 to 2100. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 15(3), e2022MS003563. https://doi.org/10.1029/2022MS003563.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 123

Jiang, J., He, S. and Fan, K. (2025). Recent impact of reduced Arctic sea-ice on the winter North Atlantic jet stream and its quantitative contributions compared to pre-industrial level. *Atmospheric Research,* 313, 107778. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107778.

Johnsson, F., Kjärstad, J. and Rootzén, J. (2019). The threat to climate change mitigation posed by the abundance of fossil fuels. *Climate Policy* 19, 258–274. https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1483885.

Jones, L.P., Banga, J., Notkin, B.S. and Brochen, A.G.J. (2024). *Closing the Gap: Trends in Adaptation Finance for Fragile and Conflict-Affected Settings*. Washington, DC: World Bank Group. http://documents.worldbank.org/curated/en/099071924093036614.

Juhola, S., Bouwer, L.M., Huggel, C., Mechler, R., Muccione, V. and Wallimann-Helmer, I. (2024). A new dynamic framework is required to assess adaptation limits. *Global Environmental Change*, 87, 102884. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2024.102884.

Kaljonen, M., Kortetmäki, T., Tribaldos, T., Huttunen, S., Karttunen, K., Maluf, R.S. *et al.* **(2021)**. Justice in transitions: Widening considerations of justice in dietary transition. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 40, 474–485. https://doi.org/10.1016/j.eist.2021.10.007.

Kapuka, A., Dobor, L. and Hlásny, T. (2022). Climate change threatens the distribution of major woody species and ecosystem services provision in southern Africa. *Science of the Total Environment*, 850, 158006. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158006.

Kern, J. D., Su, Y. and Hill, J. (2020). A retrospective study of the 2012–2016 California drought and its impacts on the power sector. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094008. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9db1.

Khan, M., Robinson, S.A., Weikmans, R., Ciplet, D. and Roberts, J.T. (2020). Twenty-five years of adaptation finance through a climate justice lens. *Climatic Change,* 161(2), 251–269. https://doi.org/10.1007/s10584-019-02563-x.

King, A.D., Ziehn, T., Chamberlain, M., Borowiak, A.R., Brown, J.R., Cassidy, L. *et al.* **(2024)**. Exploring climate stabilisation at different global warming levels in ACCESS-ESM-1.5. *Earth System Dynamics*, 15(5), 1353-1383. https://doi.org/10.5194/esd-15-1353-2024.

Klein, R.J.T., Midgley, G.F., Preston, B.L., Alam, M., Berkhout, F.G.H., Dow, K. *et al.* **(2014)**. Adaptation opportunities, constraints and limits. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. 899–943. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415379.021.

Kling, G., Lo, Y. C., Murinde, V. and Volz, U. (2025). Climate vulnerability and the cost of debt. *Oxford Open Economics* 4, odaf003. https://doi.org/10.1093/ooec/odaf003.

Klinsky, S. and Winkler, H. (2018). Building equity in: Strategies for integrating equity into modelling for a 1.5°C world. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, *Physical and Engineering Sciences,* 376(2119), 20160461. https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0461.

Koshkin, A., Marshall, A.M. and Rittger, K. (2025). Impact of current and warmer climate conditions on snow cover loss in burned forests. *Science Advances*, 11(38). https://doi.org/10.1126/sciadv.adt9866.

Krause, J.R., Cameron, C., Arias-Ortiz, A., Cifuentes-Jara, M., Crooks, S., Dahl, M. *et al.* **(2025)**. Global seagrass carbon stock variability and emissions from seagrass loss. *Nature Communications, 16*, 3798. https://doi.org/10.1038/s41467-025-59204-4.

Kreibiehl, S., Yong Jung, T., Battiston, S., Carvajal, P.E., Clapp, C., Dasgupta, D. *et al.* **(2022)**. Investment and finance. In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Shukla, P.R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., van Diemen, R., McCollum, D. *et al.* (eds.). Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press.1547–1640. https://doi.org/10.1017/9781009157926.017.

Kropf, C.M., Leung, K.L. and Mc Caughey, J.W. (2024). *Heat Impacts during Days and Nights under Climate Overshoot: A Single Hazard Multi-Impact Approach*. EGU General Assembly 2024 abstract EGU24-3169. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-3169.

Kruczkiewicz, A., Zommers, Z., Kimutai, J., Garschagen, M. and Fisher, J. (2025). The human and social impacts of climate overshoot. *PNAS Nexus*, 4(11), 332. https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgaf332.

Kumar, R., Pippal, P.S., Raj, A. and Kumar, R. (2025). Toxic contaminants in glacial meltwater and their impact on the environment and human health. *Water Conservation Science and Engineering*, 10, 54. https://doi.org/10.1007/s41101-025-00379-8.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 124

Kythreotis, A.P., Hannaford, M., Howarth, C. and Bosworth, G. (2024). Translating climate risk assessments into more effective adaptation decision-making: The importance of social and political aspects of place-based climate risk. *Environmental Science & Policy, 160*, 103705. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103705.

Lacroix, F., Burger, F.A., Silvy, Y., Schleussner, C.- F and Frölicher, T.L. (2024). Persistently elevated high-latitude ocean temperatures and global sea level following temporary temperature overshoots. *Earth's Future*, 12, e2024EF004862. https://doi.org/10.1029/2024EF004862.

Lamb, W.F. (2024). The size and composition of residual emissions in integrated assessment scenarios at net-zero CO2. *Environmental Research Letters*, 19(4), 044029. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad31db

Lamptey, B., Sahabi Abed, S., Gudoshava, M., Mutemi, J., Bopape, M., Adefisan, E.A. *et al.* **(2024)**. Challenges and ways forward for sustainable weather and climate services in Africa. *Nature Communications*, 15(1), 2664. https://doi.org/10.1038/s41467-024-46742-6.

Langevin, J., Satre-Meloy, A., Satchwell, A.J., Hledik, R., Olszewski, J., Peters, K. *et al.* **(2023)**. Demand-side solutions in the US building sector could achieve deep emissions reductions and avoid over $100 billion in power sector costs. *One Earth*, 6(8), 1005–1031. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.07.008.

Lapola, D.M., Pinho, P., Barlow, J., Aragão, L.E., Berenguer, E., Carmenta, R. *et al.* **(2023)**. The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science, 379*(6630), eabp8622. https://doi.org/10.1126/science.abp8622.

Laurance, W.F., Useche, D.C., Rendeiro, J., Kalka, M., Bradshaw, C., Sloan, S. *et al.* **(2012)**. Averting biodiversity collapse in tropical forest protected areas. *Nature*, 489(7415), 290–294. https://doi.org/10.1038/nature11318.

Lecocq, F., Winkler, H., Daka, J.P., Fu, S., Gerber, J.S., Kartha, S. *et al.* **(2022)**. Mitigation and development pathways in the near- to mid-term. In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Shukla, P.R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., van Diemen, R., McCollum, D. *et al.* (eds.). Cambridge and New York: Cambridge University Press. 409–502. https://doi.org/10.1017/9781009157926.006.

Lee, J.-Y., Marotzke, J., Bala, G., Cao, L., Corti, S., Dunne, J.P. *et al.* **(2021)**. Future global climate: scenario-based projections and near-term information. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S. and Caud, N. (eds.) . Cambridge and New York: Cambridge University Press. 553–672. https://doi.org/10.1017/9781009157896.006.

Leininger, J., Buhaug, H., Gilmore, E.A., Lindberg, S.I., Andrijevic, M. and Brutschin, E. (2026). Climate futures require politics. *Nature Communications*, 17, 3572. https://doi.org/10.1038/s41467-026-71711-6.

Lenton, T.M., Milkoreit, M., Willcock, S., Abrams, J.F., Armstrong McKay, D.I., Buxton, J.E. *et al.* **(2025)**. *The Global Tipping Points Report 2025*. Exeter, UK: University of Exeter. https://doi.org/10.5281/zenodo.18163977.

Lewis, S.L., Wheeler, C.E., Mitchard, E.T.A. and Koch, A. (2019). Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon. *Nature*, 568(7750), 25–28. https://doi.org/10.1038/d41586-019-01026-8.

Li, X., Zickfeld, K., Mathesius, S., Kohfeld, K. and Matthews, J.B.R. (2020). Irreversibility of marine climate change impacts under carbon dioxide removal. *Geophysical Research Letters*, 47(13), e2020GL088507. https://doi.org/10.1029/2020GL088507.

Li, Y., Roy, A. and Dong, X. (2022). An equality-based approach to analysing the global food system's fair share, overshoot, and responsibility for exceeding the climate change planetary boundary. *Foods*, 11(21), 3459. https://doi.org/10.3390/foods11213459.

Li, S., Liu, Y., Liu, J., Yan, G., Müller Schmied, H., Davis, S.J. *et al.* **(2025a)**. Global hydroclimatic risks and strategic decommissioning pathways for thermal power units. *Nature Sustainability*, 9, 222–233. https://doi.org/10.1038/s41893-025-01692-9.

Li, M., Wang, R., Zheng, X., Wang, C. and Rogelj, J. (2025b). Sharing emissions and removals for meeting the Paris Agreement through a distributive and corrective justice lens. *Environmental Research Letters*. https://doi.org/10.1088/1748-9326/adff2e.

Liang, S., Ziegler, A.D., Reich, P.B., Zhu, K., Wang, D., Jiang, X. *et al.* **(2025)**. Climate mitigation potential for targeted forestation after considering climate change, fires, and albedo. *Science Advances*, 11(15), eadn7915. https://doi.org/10.1126/sciadv.adn7915.

Lissner, T.K., Möller, T., Caretta, M.A. and Mukherji, A. (2024). Effectiveness of water-related adaptation decreases with increasing warming. *One Earth*, 7(3), 444-454. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.02.004.

Liu, L., Hauser, M., Windisch, M. and Seneviratne, S.I. (2025). Hysteresis and reversibility of agroecological droughts in response to carbon dioxide removal. *Nature Water*, 3(9),.1017–1024. https://doi.org/10.1038/s44221-025-00487-8.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 125

Liu, Y. and Wei, X. (2025). The role of renewable energy transitions in promoting sustainable rural tourism and cultural heritage preservation: Health, economic, and environmental impacts. *Energy, 328*, 137109. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137109.

Lotze, H.K., Tittensor, D.P., Bryndum-Buchholz, A., Eddy, T.D., Cheung, W.W.L., Galbraith, E.D. *et al.* **(2019)**. Global ensemble projections reveal trophic amplification of ocean biomass declines with climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(26), 12907–12912. https://doi.org/10.1073/pnas.1900194116.

Lüthi, S., Fairless, C., Fischer, E.M., Scovronick, N., Armstrong, B., De Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, M. *et al.* **(2023)**. Rapid increase in the risk of heat-related mortality. *Nature Communications*, 14, 4894. https://doi.org/10.1038/s41467-023-40599-x.

Lutz, W. (2024). Overshooting global warming and overshooting fertility decline. Beyond the smooth stabilization paradigm. *Vienna Yearbook of Population Research, 22,* 87–94. https://doi.org/10.1553/p-35m2-3ce3.

Ma, D., Gregor, L. and Gruber, N. (2023). Four decades of trends and drivers of global surface ocean acidification. *Global Biogeochemical Cycles*, 37(7), e2023GB007765. https://doi.org/10.1029/2023GB007765.

Mace, M.J. (2016). Mitigation commitments under the Paris Agreement and the way forward. *Climate Law*, 6(1–2), 21–39. https://doi.org/10.1163/18786561-00601002.

Mach, K.J., Kraan, C.M., Adger, W.N., Buhaug, H., Burke, M., Fearon, J.D. *et al.* **(2019)**. Climate as a risk factor for armed conflict. *Nature*, 571(7764), 193–197. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1300-6.

Mach, K.J. and Siders, A.R. (2021). Reframing strategic, managed retreat for transformative climate adaptation. *Science*, 372(6548), 1294–1299. https://doi.org/10.1126/science.abh1894.

Magnan, A.K., Oppenheimer, M., Garschagen, M., Buchanan, M.K., Duvat, V.K.E., Forbes, D.L. *et al.* **(2022)**. Sea level rise risks and societal adaptation benefits in low-lying coastal areas. *Scientific Reports, 12*(1), 10677. https://doi.org/10.1038/s41598-022-14303-w.

Magnan, A.K., Bell, R., Duvat, V.K., Ford, J.D., Garschagen, M., Haasnoot, M. *et al.* **(2023)**. Status of global coastal adaptation. *Nature Climate Change*, 13, 1248–1255. https://doi.org/10.1038/s41558-023-01834-x.

Marchau, V.A.W.J., Walker, W.E., Bloemen, P.J.T.M. and Popper, S.W. (Eds.). (2019). *Decision making under deep uncertainty: From theory to practice.* Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05252-2.

Marcianesi, F., Aulicino, G. and Wadhams, P. (2021). Arctic sea ice and snow cover albedo variability and trends during the last three decades. *Polar Science*, 28, 100617. https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100617.

Marín-Puig, A., Ariza, E. and Casellas, A. (2022). Unattended gap in local adaptation plans: The quality of vulnerability knowledge in climate risk management. *Climate Risk Management*, 38, Article 100465. https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100465.

Marshall, A. and Upadhyay, S. (2024). Hydroclimate risks to the Western US electric grid under a warming climate. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports.* Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s40518-024-00237-6.

Marshall, A.M., Grubert, E. and Warix, S. (2025). Temperature overshoot would have lasting impacts on hydrology and water resources. *Water Resources Research*, 61(1), e2024WR037950. https://doi.org/10.1029/2024WR037950.

Marzeion, B. and Levermann, A. (2014). Loss of cultural world heritage and currently inhabited places to sea-level rise. *Environmental Research Letters*, 9(3), 034001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034001.

Mascia, M.B., Pailler, S., Krithivasan, R., Roshchanka, V., Burns, D., Mlotha, M.J. *et al.* **(2014)**. Protected area downgrading, downsizing, and degazettement (PADDD) in Africa, Asia, and Latin America and the Caribbean, 1900–2010. *Biological Conservation*, 169, 355–361. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.11.021.

Matthews, T.K.R., Wilby, R.L. and Murphy, C. (2017). Communicating the deadly consequences of global warming for human heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(15), 3861–3866. https://doi.org/10.1073/pnas.1617526114.

Matthews, T., Raymond, C., Foster, J., Baldwin, J.W., Ivanovich, C., Kong, Q. *et al.* **(2025)**. Mortality impacts of the most extreme heat events. *Nature Reviews Earth & Environment*, 6, 193–210. https://doi.org/10.1038/s43017-024-00635-w.

Mayer, B. (2021). Climate change adaptation and the law. *Virginia Environmental Law Journal*, 39, 141–176. https://www.jstor.org/stable/27089292.

Mayer, B. (2024). The "highest possible ambition" on climate change mitigation as a legal standard. *International & Comparative Law Quarterly,* 73(2), 285–317. https://doi.org/10.1017/S0020589324000010.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 126

Mbow, C., Rosenzweig, C., Barioni, L.G., Benton, T.G., Herrero, M., Krishnapillai, M. *et al.* **(2019)**. Food security. In *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*. Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D.C. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. 437–550. https://doi.org/10.1017/9781009157988.007.

McKeough, P. (2022). A case for ensuring reductions in CO_2 emissions are given priority over reductions in CH_4 emissions in the near term. *Climatic Change*, 174, 4. https://doi.org/10.1007/s10584-022-03428-6.

Mechler, R., Singh, C., Ebi, K., Djalante, R., Thomas, A., James, R. *et al.* **(2020)**. Loss and damage and limits to adaptation: Recent IPCC insights and implications for climate science and policy. *Sustainability Science, 15*(4), 1245–1251. https://doi.org/10.1007/s11625-020-00807-9.

Medeiros, P. and Sivapalan, M. (2020). From hard-path to soft-path solutions: Slow–fast dynamics of human adaptation to droughts in a water scarce environment. *Hydrological Sciences Journal*, 65(11), 1803–1814. https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1770258.

Mendez, M., Creutzig, F. and Fuss, S. (2025). Deep uncertainty in carbon dioxide removal portfolios. *Environmental Research Letters*, 20, 054013. https://doi.org/10.1088/1748-9326/adc613.

Merz, J.J., Barnard, P., Rees, W.E., Smith, D., Maroni, M., Rhodes, C.J. *et al.* **(2023)**. World scientists' warning: The behavioural crisis driving ecological overshoot. *Science Progress, 106*(3). https://doi.org/10.1177/00368504231201372.

Meyer, P.B. and Schwarze, R. (2019). Financing climate-resilient infrastructure: Determining risk, reward, and return on investment. *Frontiers of Engineering Management*, 6, 117–127. https://doi.org/10.1007/s42524-019-0009-4.

Meyer, A.L.S., Bentley, J., Odoulami, R.C., Pigot, A.L. and Trisos, C.H. (2022). Risks to biodiversity from temperature overshoot pathways. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 377, 20210394. https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0394.

Meyer, A.L.S. and Trisos, C.H. (2023). Ecological impacts of temperature overshoot: The journey and the destination. *One Earth*, 6, 1614–1617. https://www.cell.com/one-earth/fulltext/S2590-3322(23)00550-X

Mikulewicz, M. (2020). The discursive politics of adaptation to climate change. *Annals of the American Association of Geographers*, 110(6), 1807–1830. https://doi.org/10.1080/24694452.2020.1736981.

Milkoreit, M. (2017). Imaginary politics: climate change and making the future. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 5, 62. https://doi.org/10.1525/elementa.249.

Milly, P.C.D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R.M., Kundzewicz, Z.W., Lettenmaier, D.P. *et al.* **(2008)**. Stationarity is dead: whither water management?. *Science*, 319(5863), 573–574. https://doi.org/10.1126/science.1151915.

Mohamed, M., Amin, S., Lever, E., Montini, A., Machida, K., Rajagopalan, S. *et al.* **(2025)**. Climate change and child wellbeing: A systematic evidence and gap map on impacts, mitigation, and adaptation. *The Lancet Planetary Health, 9*(4), e337–e346.

Mohan, A., Geden, O., Fridahl, M., Buck, H.J. and Peters, G.P. (2021). UNFCCC must confront the political economy of net-negative emissions. *One Earth,* 4(12), 1623–1626. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.10.001.

Möller, T., Högner, A.E., Schleussner, C.F., Bien, S., Kitzmann, N.H., Lamboll, R.D. *et al.* **(2024)**. Achieving net zero greenhouse gas emissions critical to limit climate tipping risks. *Nature Communications*, 15, 6192. https://doi.org/10.1038/s41467-024-49863-0.

Moore, M.-L. and Milkoreit, M. (2020). Imagination and transformations to sustainable and just futures. *Elementa: Science of the Anthropocene, 8*(1), 081. https://doi.org/10.1525/elementa.2020.081.

Morée, A.L., Lacroix, F., Cheung, W.W.L. and Frölicher, T.L. (2025). Long-term impacts of global temperature stabilization and overshoot on exploited marine species. *Biogeosciences*, 22, 1115–1133. https://doi.org/10.5194/bg-22-1115-2025.

Morris, J., Rose, S.K., Reilly, J., Gurgel, A., Paltsev, S. and Schlosser, C.A. (2025). Reconciling widely varying estimates of the global economic impacts from climate change. *Nature Climate Change*, 15, 124–127. https://doi.org/10.1038/s41558-024-02232-7.

Müller, J.D. and Gruber, N. (2024). Progression of ocean interior acidification over the industrial era. *Science Advances*, 10, eado3103. https://doi.org/10.1126/sciadv.ado3103.

Munday, G., Jones, C.D., Steinert, N.J., Mathison, C., Burke, E.J., Smith, C. *et al.* **(2025)**. Risks of unavoidable impacts on forests at 1.5°C with and without overshoot. *Nature Climate Change, 15*(6), 650–655. https://doi.org/10.1038/s41558-025-02327-9.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 127

Mycoo, M., Wairiu, M., Campbell, D., Duvat, V.K.E., Golbuu, Y., Maharaj, S.S. *et al.* **(2022)**. Small islands. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A. *et al.* (eds.). Cambridge and New York: Cambridge University Press. 2043–2121. https://doi.org/10.1017/9781009325844.017.

Mycoo, M. (2024). Commonwealth Caribbean cities, climate change adaptation and resilience: empowering local government. Commonwealth Journal of Local Governance, (29), 1-20. https://doi.org/10.5130/cjlg.vi29.9042.

Nacke, L., Vinichenko, V., Cherp, A., Jakhmola, A. and Jewell, J. (2024). Compensating affected parties necessary for rapid coal phase-out but expensive if extended to major emitters. *Nature Communications*, 15, 3742. https://doi.org/10.1038/s41467-024-47667-w.

Nalau, J. and Handmer, J. (2018). Improving Development Outcomes and Reducing Disaster Risk through Planned Community Relocation. *Sustainability,* 10(10) 3545. https://doi.org/10.3390/su10103545.

NASA Sea Level Change Team (2023). *Assessment of Sea Level Rise and Associated Impacts for Tuvalu*, N-SLCT-2023-01 Technical Report, 18. https://hdl.handle.net/10919/118078.

NASA Sea Level Change Team (2024). *Assessment of Sea Level Rise and Associated Impacts for Kiribati*, N-SLCT-2024-02 Technical Report, 18. https://doi.org/10.5281/zenodo.11480739.

Natali, S.M., Holdren, J.P., Rogers, B.M., Treharne, R., Duffy, P.B., Pomerance, R. *et al.* **(2021)**. Permafrost carbon feedbacks threaten global climate goals. *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 118(21), e2100163118. https://doi.org/10.1073/pnas.2100163118.

National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA] (2025a). *Arctic Report Card 2025*. National Oceanic and Atmospheric Administration. NOAA Arctic Report Card.

National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA] Coral Reef Watch. (2025b). *Current Global Bleaching: Status update & data submission.*

Living in the overshoot age **(2026)**. *Nature Climate Change,* 16, 227. https://doi.org/10.1038/s41558-026-02589-x.

Nauels, A., Nicholls, Z., Möller, T., Hermans, T.H.J., Mengel, M., Kloenne, U. *et al.* **(2025)**. Multi-century global and regional sea-level rise commitments from cumulative greenhouse gas emissions in the coming decades. *Nature Climate Change, 15*, 1198–1204. https://doi.org/10.1038/s41558-025-02452-5.

Nazarian, N., Krayenhoff, E.S., Bechtel, B., Hondula, D.M., Paolini, R., Vanos, J. *et al.* **(2022)**. Integrated assessment of urban overheating impacts on human life. *Earth's Future*, 10, e2022EF002682. https://doi.org/10.1029/2022EF002682.

Neumann, J.E., Chinowsky, P., Helman, J., Black, M., Fant, C., Strzepek, K. *et al.* **(2021)**. Climate effects on US infrastructure: The economics of adaptation for rail, roads, and coastal development. *Climatic Change*, 167, 44. https://doi.org/10.1007/s10584-021-03179-w.

Niu, S., Zhang, R., Wang, S., Wu, Y., Chen, W., Tian, D. *et al.* **(2024)**. The dynamic trajectory of carbon dioxide removal from terrestrial ecosystem restoration: A critical review. *Agricultural and Forest Meteorology, 358*, 110244. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110244.

O´Brien, K. and Sygna, L. (2013). Responding to climate change: The three spheres of transformation. *Proceedings of Transformation in a Changing Climate, 19-21 June 2013, Oslo, Norway*. University of Oslo, 6-23. ISBN 978-82-570-2000-2.

O'Brien, K. (2016). Climate change and social transformations: is it time for a quantum leap? *WIREs Clim Change*, 7, 618-626. https://doi.org/10.1002/wcc.413.

O'Brien, K. (2018). Is the 1.5°C target possible? Exploring the three spheres of transformation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 31, 153–160. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.04.010.

O'Brien, K. (2021a). *You matter more than you think: Quantum social change for a thriving world*. Oslo: cCHANGE Press.

O'Brien, K. (2021b). Reflecting on the Anthropocene: The call for deeper transformations. *Ambio, 50*(10), 1795–1800. https://doi.org/10.1007/s13280-020-01468-9.

O'Garra, T., Kuz, V., Deneault, A., Orr, C. and Chan, S. *et al.* **(2024)**. Early engagement and co-benefits strengthen cities' climate commitments. *Nature Cities*, 1, 315–324. https://doi.org/10.1038/s44284-024-00052-6.

O'Neill, B., van Aalst, M., Zaiton Ibrahim, Z., Berrang Ford, L., Bhadwal, S., Buhaug, H. *et al.* **(2022)**. Key risks across sectors and regions. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A. *et al.* (eds.). Cambridge and New York: Cambridge University Press. 2411–2538. https://doi.org/10.1017/9781009325844.025.

Okedele, P.O., Aziza, O.R., Oduro, P. and Ishola, A.O. (2024). Global legal frameworks for an equitable energy transition: Balancing growth and justice in developing economies. *International Journal of Applied Research in Social Sciences*, 6(12), 3667–3687. https://doi.org/10.51594/ijarss.v6i12.1765.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 128

Olazabal, M., Ruiz de Gopegui, M., Tompkins, E.L., Venner, K. and Smith, R. (2019). A cross-scale worldwide analysis of coastal adaptation planning. *Environmental Research Letters*, 14(12), 124056. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab5532.

Olazabal, M. and Ruiz De Gopegui, M. (2021). Adaptation planning in large cities is unlikely to be effective. *Landscape and Urban Planning*, 206, 103974. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103974.

Olazabal, M. and Castán Broto, V. (2022). Institutionalisation of urban climate adaptation: three municipal experiences in Spain. *Buildings and Cities*, 3(1), 570–588. https://doi.org/10.5334/bc.208.

Olazabal, M., Loroño-Leturiondo, M., Amorim-Maia, A.T., Lewis, W., and Urrutia, J. (2024). Integrating science and the arts to deglobalise climate change adaptation. *Nature Communications, 15*(1), 2971. https://doi.org/10.1038/s41467-024-47400-7.

Oliver, T.H., Isaac, N.J.B., August, T.A., Woodcock, B.A., Roy, D.B. and Bullock, J.M. (2015). Declining resilience of ecosystem functions under biodiversity loss. *Nature Communications*, 6, 10122. https://doi.org/10.1038/ncomms10122.

Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD] and The World Bank. (2016). *Climate and disaster resilience financing in small island developing states*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264266919-en.

Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD] (2024). *Infrastructure for a climate-resilient future*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/a74a45b0-en.

Ou, Y., Roney, C., Alsalam, J., Calvin, K., Creason, J., Edmonds, J. *et al.* **(2021a)**. Deep mitigation of CO_2 and non-CO_2 greenhouse gases toward 1.5°C and 2°C futures. *Nature Communications,* 12, 6245. https://doi.org/10.1038/s41467-021-26509-z.

Ou, Y., Iyer, G., Clarke, L., Edmonds, J., Fawcett, A.A., Hultman, N. *et al.* **(2021b)**. Can updated climate pledges limit warming well below 2°C?. *Science*, 374(6568), pp. 693–695. https://doi.org/10.1126/science.abl8976.

Otto, F., Keeping, T., Vrkic, D., Clarke, B., Barnes, C., Philip, S. *et al.* **(2025)**. *Unequal evidence and impacts, limits to adaptation: Extreme Weather in 2025.* WWA scientific report No. 79. World Weather Attribution. https://doi.org/10.25560/126543.

Oxford English Dictionary (2024). *Oxford English Dictionary*. Oxford. https://www.oed.com.

Palazzo Corner, S., Siegert, M., Ceppi, P., Fox-Kemper, B., Frölicher, T.L., Gallego-Sala A. *et al.* **(2023)**. The zero emissions commitment and climate stabilization. *Frontiers in Science*, 1, 1170744. https://doi.org/10.3389/fsci.2023.1170744.

Panwar, V., Wilkinson, E. and Nur, L. (2023). *Financial Arrangements for Addressing Losses and Damages: A Disaster Risk Reduction Primer*. London: ODI. https://odi.org/en/publications/financial-arrangements-for-addressing-losses-and-damages-a-disaster-risk-reduction-primer/.

Park, J.-Y., Schloesser, F., Timmermann, A., Choudhury, D., Lee, J.-Y. and Nellikkattil, A.B. (2023). Future sea-level projections with a coupled atmosphere–ocean–ice-sheet model. *Nature Communications*, 14, 636. https://doi.org/10.1038/s41467-023-36051-9.

Park, S.-W., Mun, J.-H., Lee, H., Steinert, N. J., An, S.-I., Shin, J. *et al.* **(2025)**. Continued permafrost ecosystem carbon loss under net-zero and negative emissions. *Science Advances, 11*(7), eadn8819. https://doi.org/10.1126/sciadv.adn8819.

Parkinson, C.L. and Comiso, J.C. (2013). On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm. *Geophysical Research Letters*, 40(7), . 1356–1361. https://doi.org/10.1002/grl.50349.

Parks, S.A., Holsinger, L.M., Littlefield, C.E., Dobrowski, S.Z., Zeller, K.A., Abatzoglou, J.T. *et al.* **(2022)**. Efficacy of the global protected area network is threatened by disappearing climates and potential transboundary range shifts. *Environmental Research Letters*, 17(5), 054016. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6436.

Pathak, M., Slade, R., Shukla, P.R., Skea, J., Pichs-Madruga, R. and Ürge-Vorsatz, D. (2022). Technical Summary. In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Shukla, P.R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., van Diemen, R., McCollum, D. *et al.* (eds.). Cambridge and New York: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157926.002.

Pearce-Kelly, P., Altieri, A.H., Bruno, J.F., Cornwall, C.E., McField, M., Muñiz-Castillo, A.I. *et al.* **(2025)**. Considerations for determining warm-water coral reef tipping points. *Earth System Dynamics, 16*, 275–292. https://doi.org/10.5194/esd-16-275-2025.

Pelling, M., Leck, H., Pasquini, L., Ajibade, I., Osuteye, E., Parnell, S. *et al.* **(2018)**. Africa's urban adaptation transition under a 1.5° climate. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 31, 10–15. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.11.005.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 129

Pelz, S., Ganti, G., Lamboll, R., Grant, L., Smith, C., Pachauri, S. *et al.* **(2025a)**. Using net-zero carbon debt to track climate overshoot responsibility. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 122(13), e2409316122. https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2409316122.

Pelz S., Ganti G., Pachauri S., Rogelj J. and Riahi K. (2025b). Entry points for assessing 'fair shares' in national mitigation contributions. *Environmental Research Letters*, 20(2), 024012. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ada45f Pereira, L., Frantzeskaki, N., Hebinck, A., Charli-Joseph, L., Drimie, S., Dyer, M. *et al.* (2020). Transformative spaces in the making: key lessons from nine cases in the global south. *Sustainability Science*, 15(1), 161–178. https://doi.org/10.1007/s11625-019-00749-x.

Perera, A.T., Nik, V.M., Chen, D., Scartezzini, J.L. and Hong, T. (2020). Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. *Nature Energy*, 5, 150–159. https://doi.org/10.1038/s41560-020-0558-0.

Perkins-Kirkpatrick, S.E., Alexander, L.V., King, A.D., Kew, S.F., Philip, S.Y., Barnes, C. *et al.* **(2024)**. Frontiers in attributing climate extremes and associated impacts. *Frontiers in Climate, 6*, 1455023. https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1455023.

Petzold, J., Hawxwell, T., Jantke, K., Gonçalves Gresse, E., Mirbach, C., Ajibade, I. *et al.* **(2023)**. A global assessment of actors and their roles in climate change adaptation. *Nature Climate Change, 13*(11), 1250–1257. https://doi.org/10.1038/s41558-023-01824-z.

Pfenning-Butterworth, A., Buckley, L.B., Drake, J.M., Farner, J.E., Farrell, M.J., Gehman, A.-L.M. *et al.* **(2024)**. Interconnecting global threats: Climate change, biodiversity loss, and infectious diseases. *The Lancet Planetary Health, 8*(4), e270–e283. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00021-4.

Pfleiderer, P., Schleussner, C.-F. and Sillmann, J. (2024). Limited reversal of regional climate signals in overshoot scenarios. *Environmental Research: Climate*, 3, 015005. https://doi.org/10.1088/2752-5295/ad1c45.

Philip, S.Y., Kew, S.F., van Oldenborgh, G.J., Anslow, F.S., Seneviratne, S.I., Vautard, R. *et al.* **(2022)**. Rapid attribution analysis of the extraordinary heat wave on the Pacific coast of the US and Canada in June 2021. *Earth System Dynamics*, 13, 1689–1713. https://doi.org/10.5194/esd-13-1689-2022.

Portmann, V., Swingedouw, D., Khattab, O. and Chavent, M. (2026). Observational constraints project a ~50% AMOC weakening by the end of this century. *Science Advances, 12*, eadx4298. https://doi.org/10.1126/sciadv.adx4298.

Prütz, R., Rogelj, J., Ganti, G., Price, J., Warren, R., Forstenhäusler, N. *et al.* **(2026)**. Biodiversity implications of land-intensive carbon dioxide removal. *Nature Climate Change, 16*(2), 155–163. https://doi.org/10.1038/s41558-026-02557-5.

Pugh, T.A.M., Jones, C.D., Huntingford, C., Burton, C., Arneth, A., Brovkin, V. *et al.* **(2018)**. A large committed long-term sink of carbon due to vegetation dynamics. *Earth's Future, 6*(10), 1413–1432. https://doi.org/10.1029/2018EF000935.

Qi, D., Ouyang, Z., Chen, L., Wu, Y., Lei, R., Chen, B. *et al.* **(2022)**. Climate change drives rapid decadal acidification in the Arctic Ocean from 1994 to 2020. *Science*, 377(6614), 1544–1550. https://doi.org/10.1126/science.abo0383.

Quilcaille, Y., Gudmundsson, L., Schumacher, D.L., Gasser, T., Heede, R., Heri, C. *et al.* **(2025)**. Systematic attribution of heatwaves to the emissions of carbon majors. *Nature, 645*(8080), 392–398. https://doi.org/10.1038/s41586-025-09450-9.

Raikes, J., Smith, T.F., Jacobson, C. and Baldwin, C. (2019). Pre-disaster planning and preparedness for floods and droughts: A systematic review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 38, 101207. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101207.

Rajamani, L. and Werksman, J. (2018). The legal character and operational relevance of the Paris Agreement's temperature goal. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 376(2119), 20160458. https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0458.

Rajamani, L., White, E., Rogelj, J., Prütz, R., Wetzer, T., Wood, M. *et al.* **(2026)**. Legal guardrails on states' dependence on carbon dioxide removal to meet climate targets. *Climate Policy*. https://doi.org/10.1080/14693062.2025.2599861.

Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K. *et al.* **(2022)**. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment*, 3, 168. https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3.

Raymond, C., Horton, R.M., Zscheischler, J., Martius, O., AghaKouchak, A., Balch, J. *et al.* **(2020a)**. Understanding and managing connected extreme events. *Nature Climate Change*, 10(7), 611–621. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0790-4.

Raymond, C., Matthews, T. and Horton, R.M. (2020b). The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance. *Science Advances*, 6, eaaw1838. https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw1838.

Reckien, D., Buzasi, A., Olazabal, M., Spyridaki, N.-A., Eckersley, P, Simoes, S.G. *et al.* **(2023)** Quality of urban climate adaptation plans over time. *npj Urban Sustain* 3, 13. https://doi.org/10.1038/s42949-023-00085-1

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 130

Rees, W.E. (2023). The human ecology of overshoot: Why a major population correction is inevitable. *World*, 4(3), 509–527. https://doi.org/10.3390/world4030032.

Reese, R., Garbe, J., Hill, E.A., Urruty, B., Naughten, K.A., Gagliardini, O. *et al.* **(2023)**. The stability of present-day Antarctic grounding lines—Part 2: Onset of irreversible retreat of Amundsen Sea glaciers under current climate on centennial timescales cannot be excluded. *The Cryosphere, 17*(9), 3761–3783. https://doi.org/10.5194/tc-17-3761-2023.

Reimer, J.D., Peixoto, R.S., Davies, S.W., Traylor-Knowles, N., Short, M.L., Cabral-Tena, R.A. *et al.* **(2024)**. The Fourth Global Coral Bleaching Event: Where do we go from here? *Coral Reefs, 43*, 1121–1125. https://doi.org/10.1007/s00338-024-02504-w.

Reis, M.D., Graça, P.M.L.A., Yanai, A.M., Ramos, C.J.P. and Fearnside, P.M. (2021). Forest fires and deforestation in the central Amazon: Effects of landscape and climate on spatial and temporal dynamics. *Journal of Environmental Management,* 288, 112310. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112310.

Reisinger, A., Clark, H., Cowie, A.L., Emmet-Booth, J., Gonzalez Fischer, C. and Herrero, M. (2021). How necessary and feasible are reductions of methane emissions from livestock to support stringent temperature goals? *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2210), 20200452. https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0452.

Reisinger, A., Fuglestvedt, J.S., Pirani, A., Geden, O., Jones, C.D., Maharaj, S. *et al.* **(2025)**. Overshoot: A conceptual review of exceeding and returning to global warming of 1.5°C. *Annual Review of Environment and Resources*, 50(1), 185-217. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-111523-102029.

Riahi, K., Schaeffer, R., Arango, J., Calvin, K., Guivarch, C., Hasegawa, T. *et al.* **(2022)**. Mitigation pathways compatible with long-term goals. In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Shukla, P.R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., van Diemen, R., McCollum, D. *et al.* (eds.). Cambridge and New york: Cambridge University Press. Chapter 3. 295-408. https://doi.org/10.1017/9781009157926.005.

Riahi, K., Clarke, L., Hasegawa, T., Huppmann, D., Kriegler, E., Luderer, G. *et al.* **(2026)**. Mitigation benchmarks from the 2025 community update of global emissions pathways. *Research Square*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-8891091/v1.

Ricciardi, L., D'Odorico, P., Galli, N., Chiarelli, D.D., and Rulli, M.C. (2022). Hydrological implications of large-scale afforestation in tropical biomes for climate change mitigation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 377*(1857), 20210391. https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0391.

Ritchie, P.D.L., Clarke, J.J., Cox, P.M. and Huntingford (2021). Overshooting tipping point thresholds in a changing climate. *Nature, 592*(7855), 517–523. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03263-2.

Ritchie, P.D.L., Steinert, N.J., Abrams, J.F., Alkhayuon, H., Arnscheidt, C.W., Bochow, N. *et al.* **(2026)**. The implications of overshooting 1.5°C on Earth system tipping elements—a review. *Environmental Research Letters, 21*(4), 043001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ae3cad.

Robinson, A., Calov, R. and Ganopolski, A. (2012). *Multistability and critical thresholds of the Greenland ice sheet*. *Nature Climate Change, 2*(6), 429–432. https://doi.org/10.1038/nclimate1449.

Robiou du Pont, Y., Dekker, M., van Vuuren, D. and Schaeffer, M. (2025). Effect of discontinuous fair-share emissions allocations immediately based on equity. *Nature Communications*, 16(1), Article 8020. https://doi.org/10.1038/s41467-025-62947-9.

Rogelj, J., Schaeffer, M., Meinshausen, M., Shindell, D.T., Hare, W., Klimont, Z. e*t al.* **(2014)**. Disentangling the effects of CO2 and short-lived climate forcer mitigation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(46), 16325-16330. https://doi.org/10.1073/pnas.1415631111.

Rogelj, J., Schaeffer, M., Meinshausen, M., Knutti, R., Alcamo, J., Riahi, K. *et al.* **(2015)**. Zero emission targets as long-term global goals for climate protection. *Environmental Research Letters*, 10(10), 105007. https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/10/105007.

Rogelj, J., den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H. *et al.* **(2016)**. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature*, 534(7609), 631–639. https://doi.org/10.1038/nature18307.

Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V. *et al.* **(2018a)**. Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development. In *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report*. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R. *et al.* (eds.). Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. Chapter 2. 93-174. https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-2/.

Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K.V., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D. *et al.* **(2018b)**. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5°C. *Nature Climate Change, 8*, 325–332. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0091-3.

Rogelj, J., Huppmann, D., Krey, V., Riahi, K., Clarke, L., Gidden, M. *et al.* **(2019)**. A new scenario logic for the Paris Agreement long-term temperature goal. *Nature, 573*, 357–363. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1541-4.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 131

Rogelj, J. and Rajamani, L. (2025). The pursuit of 1.5°C endures as a legal and ethical imperative in a changing world. *Science*, 389, 238–240. https://doi.org/10.1126/science.ady1186.

Rogelj, J., Pirani, A., Reisinger, A. and Schleussner, C.-F. (2026). Practical guidance towards consistent use of overshoot terminology. *Environmental Research Letters,* 21(11), 110201. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ae70c2.

Rosa, L., Sanchez, D.L., Realmonte, G., Baldocchi, D. and D'Odorico, P. (2021). The water footprint of carbon capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110511. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110511.

Rosenzweig, C., Mbow, C., Barioni, L.G., Benton, T.G., Herrero, M., Krishnapillai, M. *et al.* **(2020)**. Climate change responses benefit from a global food system approach. *Nature Food*, 1, 94–97. https://doi.org/10.1038/s43016-020-0031-z.

Rounce, D.R., Hock, R., Maussion, F., Hugonnet, R., Kochtitzky, W., Huss, M. *et al.* **(2023)**. Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters. *Science.* 379, 78-83(2023). https://www.science.org/doi/10.1126/science.abo1324

Roy, J., Tschakert, P., Waisman, H., Abdul Halim, S., Antwi-Agyei, P., Dasgupta, P. *et al.* **(2018)**. Sustainable Development, Poverty Eradication and Reducing Inequalities. In *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R. *et al.* (eds.). Cambridge and New York: Cambridge University Press. 445–538. https://doi.org/10.1017/9781009157940.007.

Ruggiero, A., Piotrowicz, W.D. and John, L. (2024). Enhancing societal resilience through the whole-of-society approach to crisis preparedness: Complex adaptive systems perspective – The case of Finland. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104944.

Sachs, J.D., Abdool Karim, S.S., Aknin, L., Allen, J., Brosbøl, K., Colombo, F. *et al.* **(2022)**. The Lancet Commission on lessons for the future from the COVID-19 pandemic. *The Lancet*, 400, 1224–1280. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)01585-9.

Saeed, F., Schleussner, C.-F. and Almazroui, M. (2021). From Paris to Makkah: Heat stress risks for Muslim pilgrims at 1.5°C and 2°C. *Environmental Research Letters*, 16(2), 024037. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd067.

Saintilan, N., Horton, B., Törnqvist, T.E., Ashe, E.L., Khan, N.S., Schuerch, M. *et al.* **(2023)**. Widespread retreat of coastal habitat is likely at warming levels above 1.5 °C. *Nature*, 621(7977), 112–119. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06448-z.

Salomaa, A. and Juhola, S. (2020). How to assess sustainability transformations? A review. *Global Sustainability*, 3, e24. https://doi.org/10.1017/sus.2020.17.

Sandi, S.G., Rodriguez, J.F., Saco, P.M., Saintilan, N. and Riccardi, G. (2021). Accelerated sea-level rise limits vegetation capacity to sequester soil carbon in coastal wetlands: A study case in southeastern Australia. *Earth's Future, 9*, e2020EF001901. https://doi.org/10.1029/2020EF001901.

Santana-Falcón, Y., Yamamoto, A., Lenton, A., Jones, C.D., Burger, F.A., John, J.G. *et al.* **(2023)**. Irreversible loss in marine ecosystem habitability after a temperature overshoot. *Communications Earth & Environment*, 4, Article 343. https://doi.org/10.1038/s43247-023-01002-1.

Satterthwaite, D., Archer, D., Colenbrander, S., Dodman, D., Hardoy, J., Mitlin, D. *et al.* **(2020)**. Building resilience to climate change in informal settlements. *One Earth*, 2(2), 143–156. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.002.

Schädel, C., Gasser, T., Rogers, B., Treharne, R., Turetsky, M., Smith, T. *et al.* **(2026)**. Permafrost and wildfire carbon emissions indicate need for additional action to keep Paris Agreement temperature goals within reach. *Communications Earth & Environment*, 7, Article e306. https://doi.org/10.1038/s43247-026-03189-5.

Scheiter, S., Kumar, D., Corlett, R.T., Gaillard, C., Langan, L., Lapuz, R.S. *et al.* **(2020)**. Climate change promotes transitions to tall evergreen vegetation in tropical Asia. *Global Change Biology, 26*(11), 5870–5883. https://doi.org/10.1111/gcb.15217.

Schipper, E.L.F., Revi, A., Preston, B.L., Carr, E.R., Eriksen, S.H., Fernandez-Carril, L.R. *et al.* **(2022)**. Climate resilient development pathways. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A. *et al.* (eds.). Cambridge and New York: Cambridge University Press. 2655–2807. https://doi.org/10.1017/9781009325844.027

Schleussner, C.-F., Deryng, D., Müller, C., Elliott, J., Saeed, F., Folberth, C. *et al.* **(2018)**. Crop productivity changes in 1.5 °C and 2 °C worlds under climate sensitivity uncertainty. *Environmental Research Letters*, 13, 064007. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab63b.

Schleussner, C.-F., Ganti, G., Lejeune, Q., Zhu, B., Pfleiderer, P., Prütz, R. *et al.* **(2024)**. Overconfidence in climate overshoot. *Nature*, 634(8033), 366–373. https://doi.org/10.1038/s41586-024-08020-9.

Schlitz, M.M., Vieten, C. and Miller, E.M. (2010). Worldview transformation and the development of social consciousness. *Journal of Consciousness Studies*, 17(7–8), 18–36. https://www.researchgate.net/publication/233666298_Worldview_Transformation_and_the_Development_of_Social_Consciousness.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 132

Schönfeld, J.K. and Rogelj, J. (2025). A framework to assess highest possible ambition in nationally determined contributions under Article 4 of the Paris Agreement. *Environmental Research Letters*, 20(11), 114081. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ae15aa.

Schuur, E.A.G., Abbott, B.W., Commane, R., Ernakovich, J., Euskirchen, E., Hugelius, G. *et al.* **(2022)**. Permafrost and climate change: Carbon cycle feedbacks from the warming Arctic. *Annual Review of Environment and Resources*, 47, 343–371. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-011847.

Schuster, L., Maussion, F., Rounce, D.R., Ultee, L., Schmitt, P., Lacroix, F. *et al.* **(2025)**. Irreversible glacier change and trough water for centuries after overshooting 1.5°C. *Nature Climate Change, 15*(6), 634–641. https://doi.org/10.1038/s41558-025-02318-w.

Schwinger, J., Asaadi, A., Steinert, N.J. and Lee, H. (2022). Emit now, mitigate later? Earth system reversibility under overshoots of different magnitudes and durations. *Earth System Dynamics, 13*, 1641–1665. https://doi.org/10.5194/esd-13-1641-2022.

Seddon, N., Smith, A., Smith, P., Key, I., Chausson, A., Girardin, C. *et al.* **(2021)**. Getting the message right on nature-based solutions to climate change. *Global Change Biology*, 27(8), 1518–1546. https://doi.org/10.1111/gcb.15513.

Seneviratne, S.I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A. *et al.* **(2021)**. Weather and climate extreme events in a changing climate. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S. *et al.* (eds.). Cambridge and New York: Cambridge University Press. 1513–1766. https://doi.org/10.1017/9781009157896.013.

Seto, K.C., Davis, S.J., Mitchell, R.B., Stokes, E.C., Unruh, G. and Ürge-Vorsatz, D. (2016). Carbon lock-in: Types, causes, and policy implications. *Annual Review of Environment and Resources*, 41, 425–452. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085934.

Sguotti, C., Otto, S.A., Frelat, R., Langbehn, T.J., Plambech Ryberg, M., Lindegren, M. *et al.* **(2019)**. Catastrophic dynamics limit Atlantic cod recovery. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 286*(1898), 20182877. https://doi.org/10.1098/rspb.2018.2877.

Sharifi, A. (2020). Trade-offs and conflicts between urban climate change mitigation and adaptation measures: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 276, 122813. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122813.

Sharifi, A. (2021). Co-benefits and synergies between urban climate change mitigation and adaptation measures: A literature review. *Science of The Total Environment*, 750, 141642. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141642.

Shindell, D., Sadavarte, P., Aben, I., Bredariol, T.O., Dreyfus, G., Höglund-Isaksson, L. *et al.* **(2024)**. The methane imperative. *Frontiers in Science, 2*, 1349770. https://doi.org/10.3389/fsci.2024.1349770.

Siehr, S.A., Sun, M. and Aranda Nucamendi, J.L. (2022). Blue-green infrastructure for climate resilience and urban multifunctionality in Chinese cities. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment,* 11(5), e447. https://doi.org/10.1002/wene.447.

Silva, J.L.G., Capistrano, V.B., Veiga, J.A.P. and Brito, A.L. (2024). Impacts of climate change and deforestation on fire risk in the Amazon basin. *Climate Research,* 93. https://doi.org/10.3354/cr01745.

Silveira, M.V.F., Keys, P.W., Ruhoff, A., Artaxo, P., Costa, M.H., Anderson, L.O. *et al.* **(2025)**. Observed shifts in regional climate linked to Amazon deforestation. *Communications Earth & Environment, 6*, 948. https://doi.org/10.1038/s43247-025-02900-2.

Simpson, N.P., Mach, K.J., Constable, A., Hess, J., Hogarth, R., Howden, M. *et al.* **(2021)**. A framework for complex climate change risk assessment. *One Earth,* 4(4), 489–501. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.03.005.

Simpson, N.P., Sparkes, E., de Ruiter, M., Šakić Trogrlić, R., Vieira Passos, M., Schlumberger, J. *et al.* **(2025)**. Advances in complex climate change risk assessment for adaptation. *npj Climate Action* 4, 74. https://doi.org/10.1038/s44168-025-00281-y.

Sitati, A, Joe, E., Pentz, B., Grayson, C., Jaime, C., Gilmore, E. *et al.* **(2021)**. Climate change adaptation in conflict-affected countries: A systematic assessment of evidence. Discover Sustainability, 2(1), 1-15. https://doi.org/10.1007/s43621-021-00052-9.

Skiles, S.M., Flanner, M., Cook, J.M., Dumont, M. and Painter, T.H. (2018). Radiative forcing by light-absorbing particles in snow. *Nature Climate Change,* 8(11), 964–971. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0296-5.

Smith, L.J. and Torn, M.S. (2013). Ecological limits to terrestrial biological carbon dioxide removal. *Climatic Change*, 118, 89–103. https://doi.org/10.1007/s10584-012-0682-3.

Smith, C.J., Forster, P.M., Allen, M., Fuglestvedt, J., Millar, R.J., Rogelj, J. *et al.* **(2019a)**. Current fossil fuel infrastructure does not yet commit us to 1.5°C warming. *Nature Communications, 10*, 101. https://doi.org/10.1038/s41467-018-07999-w.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 133

Smith, P., Nkem, J., Calvin, K., Campbell, D., Cherubini, F., Grassi, G. *et al.* **(2019)**. Interlinkages between desertification, land degradation, food security and greenhouse gas fluxes: Synergies, trade-offs and integrated response options. In *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems.* Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D.C. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. 551–672. https://doi.org/10.1017/9781009157988.008.

Smith, C. and Mathison, C. (2024). How much methane removal is required to avoid overshooting 1.5 °C? *Environmental Research Letters*, 19(7), Article 074044. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad5853.

Smith, S.M., Geden, O., Gidden, M.J., Lamb, W.F., Nemet, G.F., Minx, J.C. *et al.* **(2024)**. *The State of Carbon Dioxide Removal – 2nd Edition*. The State of Carbon Dioxide Removal. https://pure.iiasa.ac.at/19787

Smith, C., Ramme, L., Wells, C.D., Gjermundsen, A., Li, H., Ilyina, T. *et al.* **(2025)**. Overshoot and (ir)reversibility to 2300 in two CO_2-emissions driven Earth system models. *EGUsphere* [Preprint]. https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-5292.

Smith, S.M., Grassi, G., Gupta, S., Schwingshackl, C., Harrington, K.J., Pilli, R. *et al.* **(2026)**. Chapter 7: Current levels of CDR. In *The State of Carbon Dioxide Removal 3rd Edition 2026.* Edwards, M.R. *et al.* (eds.) . https://doi.org/10.17605/OSF.IO/VH7U6.

Song, Y., Li, Z. and Lee, C.C. (2025a). The impact of climate policy on energy equity: Effect, mechanism, and spatial analysis. *Humanities and Social Sciences Communications*, 12(1), 1–14. https://doi.org/10.1057/s41599-025-06009-x

Song, L., He, B., Ahmad, S., Li, Q., Chen, A. and Mao, W. (2025b). Seagrass ecosystems in peril: Climate change threatens blue carbon storage and ecosystem services. *iScience, 28*, 112909. https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112909.

Sparkes, E., Totin, E., Werners, S.E., Wise, R.M., Butler, J.R.A. and Vincent, K. (2023). Adaptation pathways to inform policy and practice in the context of development. *Environmental Science & Policy,* 140, 279–285. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.12.011.

Spencer, T., Magnan, A.K., Donner, S., Garschagen, M., Ford, J., Duvat, V.K.E. *et al.* **(2024)**. Habitability of low-lying socio-ecological systems under a changing climate. *Climatic Change*, 177, 14. https://doi.org/10.1007/s10584-023-03675-1?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle.

Steinert, N.J., Schwinger, J., Chadwick, R., Kug, J.-S. and Lee, H. (2025). Irreversible land water availability changes from a potential ITCZ shift during temperature overshoot. *Earth's Future*, 13(5), e2024EF005787. https://doi.org/10.1029/2024EF005787.

Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review.* Cambridge University Press.

Stockholm Environment Institute [SEI], Climate Analytics and International Institute for Sustainable Development [IISD] (2025). *The Production Gap Report 2025*. Stockholm Environment Institute, Climate Analytics and International Institute for Sustainable Development. https://doi.org/10.51414/sei2025.044.

Stoddard, I., Anderson, K., Capstick, S., Carton, Depledge, J., Facer, K. e*t al.* **(2021)**. Three Decades of Climate Mitigation: Why Haven't We Bent the Global Emissions Curve?. *Annual Review of Environment and Resources* 46, 653-689. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-011104.

Stokes, C.R., Bamber, J.L., Dutton, A. and DeConto, R.M. (2025). Warming of +1.5 °C is too high for polar ice sheets. *Communications Earth & Environment*, 6, 351. https://doi.org/10.1038/s43247-025-02299-w.

Storlazzi, C.D., Gingerich, S.B., van Dongeren, A., Cheriton, O.M., Swarzenski, P.W., Quataert, E. *et al.* **(2018)**. Most atolls will be uninhabitable by the mid-21st century because of sea-level rise exacerbating wave-driven flooding. *Science Advances*, 4(4), eaap9741. https://doi.org/10.1126/sciadv.aap9741.

Stroeve, J.C., Notz, D., Dawson, J., Schuur, E.A.G., Dahl-Jensen, D. and Giesse, C. (2025). Disappearing landscapes: The Arctic at +2.7°C global warming. *Science*, 387(6734), 616–621. https://doi.org/10.1126/science.ads1549.

Stuart-Smith, R.F., Rajamani, L., Rogelj, J. and Wetzer, T. (2023). Legal limits to the use of CO_2 removal. *Science*, 382, 772–774. https://doi.org/10.1126/science.adi9332.

Sverdlik, A., Kothiwal, K., Kadungure, A., Agarwal, S., Machemedze, R., Verma, S. *et al.* **(2024)**. Understanding the interplay of occupational, public health, and climate-related risks for informal workers: A new framework with findings from Zimbabwe and India. *Social Science & Medicine,* 348, 116750. https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2024.116750.

Tachiiri, K., Silva Herran, D., Su, X. and Kawamiya, M. (2019). Effect on the Earth system of realizing a 1.5 °C warming climate target after overshooting to the 2 °C level. *Environmental Research Letters*, 14(12), 124063. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab5199.

Tarshish, N., Jeevanjee, N. and Fung, I. (2026). Multi-century cooling after net-zero greenhouse gas emissions. *Nature Climate Change*, 16(8), 941–946. https://doi.org/10.1038/s41558-026-02700-2.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 134

Tavoni, M., Andreoni, P., Calcaterra, M., Calliari, E., Deubelli-Hwang, T., Mechler, R. *et al.* **(2024)**. Economic quantification of loss and damage funding needs. *Nature Reviews Earth & Environment* 5, 411–413. https://doi.org/10.1038/s43017-024-00565-7.

Tavoni, M., Bauer, N., Drouet, L., Fujimori, S., Paltsev, S., Pirani, A. *et al.* **(2026)**. Implications of overshoot for climate mitigation strategies. *Nature Climate Change*, 16(3), 261-272. https://doi.org/10.1038/s41558-026-02563-7.

Tennant, E. and Gilmore, E.A. (2020). Government effectiveness and institutions as determinants of tropical cyclone mortality. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117(46), 28692–28699. https://doi.org/10.1073/pnas.2006213117.

Terry, J.P. and Chui, T.F.M. (2012). Evaluating the fate of freshwater lenses on atoll islands after eustatic sea-level rise and cyclone-driven inundation: A modelling approach. *Global and Planetary Change, 88–89*, 76–84. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.03.008.

Theokritoff, E., Lejeune, Q., Costa, H. P., Irfan, K., Khan, M. S., Kropf, C. M. *et al.* **(2026)**. Climate overshoot implications for local adaptation planning. Climate Policy, 26(2), 344–351. https://doi.org/10.1080/14693062.2025.2502111.

Thomas, A. and Benjamin, L. (2018). Policies and mechanisms to address climate-induced migration and displacement in Pacific and Caribbean small island developing states. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 10(1), 86–104. https://doi.org/10.1108/IJCCSM-03-2017-0055.

Tölgyesi, C., Csikós, N., Temperton, V.M., Buisson, E., Silveira, F.A.O., Lehmann, C.E.R. *et al.* **(2025)**. Limited carbon sequestration potential from global ecosystem restoration. *Nature Geoscience*. https://doi.org/10.1038/s41561-025-01742-z.

Trisos, C.H., Adelekan, I.O., Totin, E., Ayanlade, A., Efitre, J., Gemeda, A. *et al.* **(2022)**. Africa. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A. *et al.* (eds.). Cambridge: Cambridge University Press. 1285–1455. https://doi.org/10.1017/9781009325844.011.

Turetsky, M.R., Abbott, B.W., Jones, M.C., Anthony, K.W., Olefeldt, D., Schuur, E.A.G. *et al.* **(2020)**. Carbon release through abrupt permafrost thaw. *Nature Geoscience*, 13, 138–143. https://doi.org/10.1038/s41561-019-0526-0.

Ulpiani, G., Vetters, N., Gevers Deynoot, C., Aktas, S., Barberi, M., Rodriguez Mendez, Q. *et al.* **(2026)**. Guidance on negative emissions for cities: Guidance on the definition of residual emissions in net-zero emissions targets, on decision-making and accounting around carbon removal. *Publications Office of the European Union*. https://doi.org/10.2760/5398979.

United Nations [UN] (2023). *UN 2.0: Forward-thinking culture and cutting-edge skills for better United Nations system impact*. Our Common Agenda Policy Brief 11. New York: United Nations. https://digitallibrary.un.org/record/4021171?v=pdf#files.

United Nations [UN] (2025). *World Urbanization Prospects 2025: Summary of Results*. UN DESA/POP/2025/TR/NO. 12. New York: United Nations. https://desapublications.un.org/file/21497/download.

United Nations Conference on Trade and Development [UNCTAD] (2025). *Unlocking the virtuous circle – from financing for development to financing from development: Concept note*. UN Trade and Development (UNCTAD). https://unctad.org/system/files/information-document/ffd4-2025-07-02-ngic-concept-note_en.pdf.

United Nations Department of Economic and Social Affairs [UN DESA] (2021). Disasters after Disasters: Short Recovery Intervals and Large Financial Gaps in Small Island Developing States. United Nations Department of Economic and Social Affairs, Division for Sustainable Development Goals. Retrieved from: https://sdgs.un.org/news/disasters-after-disasters-short-recovery-intervals-and-large-financial-gaps-small-islands.

United Nations Development Programme [UNDP], Kjellén, M. and Wong, C. (2023). Governance: A 'whole-of-society' approach. In *The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water*. 172–182. Paris: UNESCO. https://www.unesco.org/reports/wwdr/2023/en/download.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2013). *The Emissions Gap Report 2013*. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8345.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2014). *The Emissions Gap Report 2014: A UNEP Synthesis Report*. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/9345.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2015). *The Emissions Gap Report 2015: A UNEP Synthesis Report*. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/items/1c4f7a45-509c-4adb-8865-e7030287f4c6.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 135

United Nations Environment Programme [UNEP] (2016). *The Emissions Gap Report 2016: A UNEP Synthesis Report*. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/10016.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2017). *The Emissions Gap Report 2017: A UN Environment Synthesis Report*. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/22070.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2018). *The Emissions Gap Report 2018*. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/26895.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2019). *The Emissions Gap Report 2019*. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/30797.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2020). *The Emissions Gap Report 2020*. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/34426.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2021). *The Emissions Gap Report 2021: The Heat Is On – A World of Climate Promises Not Yet Delivered*. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/36990.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2022). *Emissions Gap Report 2022: The Closing Window – Climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies*. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/items/23d8e399-417f-4c91-b083-bf2e74eab0f2.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2023). *Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures Hit New Highs, Yet World Fails to Cut Emissions (Again)*. Report No. DEW/2589/NA. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/items/1e99024f-4ecf-44c8-b19c-02174832ece4.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2024a). *Adaptation Gap Report 2024: Come Hell and High Water*. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/items/b8964bdc-a2f8-4153-96fd-a1e4141bff75.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2024b). *Emissions Gap Report 2024: No More Hot Air … Please! With a Massive Gap between Rhetoric and Reality, Countries Draft New Climate Commitments*. Report No. DEW/2672/NA. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/items/31ad9a4b-0c90-408e-adc0-921538ead02a.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2024c). *Navigating New Horizons: A Global Foresight Report on Planetary Health and Human Wellbeing*. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/items/6377804d-7311-45f0-8564-8965452e343a.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2025a). *Adaptation Gap Report 2025: Running on Empty*. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/items/b547996e-14ee-4f1c-a6d4-b811dd373ae9.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2025b). *Emissions Gap Report 2025: Off Target – Continued Collective Inaction Puts Global Temperature Goal at Risk*. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/48854.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2025c). *Global Methane Status Report*. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/48921.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2025d). *The Free Degrees: How Sustainable, Passive-first Cooling Can Save Lives, Money and Food*. ISBN 978-92-807-4241-1. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/48926.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2025e). *Global Environment Outlook 7: For People, For Planet*. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/items/bba44efd-7715-4054-8432-92b270ee9d67.

United Nations Environment Programme [UNEP] (2025f). UNEP GEO Glossary. Retrieved from UNEP GEO Glossary

United Nations Environment Programme [UNEP] (2026). *Global Status Report for Buildings and Construction 2025–2026: Building Fast. Falling Short. As Climate Risks Rise and Cities Grow, We Must Rethink How We Build to Create Better Lives for All*. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/49531.

United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC] (2015a). *Adoption of the Paris Agreement*. 12 December. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf.

United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC] (2015b). *Report of the Conference of the Parties on its Twenty-First Session, Held in Paris from 30 November to 13 December 2015. Addendum*. Decision 10/CP.21. 29 January 2016. FCCC/CP/2015/10/Add.2. https://digitallibrary.un.org/record/831071/files/FCCC_CP_2015_10_Add-2-EN.pdf.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 136

United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC] (2018). *Modalities, Procedures and Guidelines for the Transparency Framework for Action and Support Referred to in Article 13 of the Paris Agreement*. FCCC/PA/CMA/2018/3/Add.2. Bonn: United Nations Framework Convention on Climate Change. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2018_3_add2_new_advance.pdf.

United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC] (2021). *Glasgow Climate Pact*. Decision 1/CMA.3. 13 November. FCCC/PA/CMA/2021/10/Add.1. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_10a01E.pdf.

United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC] (2023). *Operationalization of the New Funding Arrangements, Including a Fund, for Responding to Loss and Damage Referred to in Paragraphs 2–3 of Decisions 2/CP.27 and 2/CMA.4*. Decision 1/CP.28 and Decision 5/CMA.5. Report of the Conference of the Parties on its twenty-eighth session, Dubai, 30 November–13 December 2023. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma5_auv_10g_LnDfunding.pdf.

United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC] (2023a). *Report of the Conference of the Parties Serving as the Meeting of the Parties to the Paris Agreement on its Fifth Session, Held in the United Arab Emirates from 30 November to 13 December 2023. Addendum. Part Two: Action Taken by the Conference of the Parties Serving as the Meeting of the Parties to the Paris Agreement at its Fifth Session*. Published 15 March 2024. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2023_16a02E.pdf.

United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC] (2023b). *Global Renewables and Energy Efficiency Pledge*. https://www.cop28.com/en/global-renewables-and-energy-efficiency-pledge.

United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC] (2025). *Report of the Board of the Fund for Responding to Loss and Damage. Note by the Secretariat. Addendum*. FCCC/CP/2025/10/Add.1–FCCC/PA/CMA/2025/14/Add.1. Bonn: United Nations Framework Convention on Climate Change. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop2025_10a1_cma2025_14a1_E.pdf (accessed 11 August 2026).

United Nations General Assembly [UNGA] (2026). Advisory opinion of the International Court of Justice on the obligations of States in respect of climate change. A/RES/80/263. New York: United Nations. https://digitallibrary.un.org/record/4114032.

United Nations Women [UN Women] and United Nations Department of Economic and Social Affairs [UN DESA] (2025). *Progress on the Sustainable Development Goals: The Gender Snapshot 2025*. United Nations. https://unstats.un.org/sdgs/gender-snapshot/2025/.

Urban, M.C. (2024). Climate change extinctions. *Science, 386*(6724), 1123–1128. https://doi.org/10.1126/science.adp4461.

Ürge-Vorsatz, D., Rosenzweig, C., Dawson, R.J., Sanchez Rodriguez, R., Bai, X., Barau, A.S. *et al.* **(2018)**. Locking in positive climate responses in cities. *Nature Climate Change*, 8, 174–177. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0100-6.

van den Akker, T., Lipscomb, W.H., Leguy, G.R., Bernales, J., Berends, C.J., van de Berg, W.J. *et al.* **(2025)**. Present-day mass loss rates are a precursor for West Antarctic Ice Sheet collapse. *The Cryosphere, 19*(1), 283–301. https://doi.org/10.5194/tc-19-283-2025.

van der Wijst, KI., Bosello, F., Dasgupta, S., Drouet, L., Emmerling, J., Hof, A. e*t al.* **(2023)**. New damage curves and multimodel analysis suggest lower optimal temperature. *Nature Climate Change*, 13, 434–441. https://doi.org/10.1038/s41558-023-01636-1.

van der Spek, M., Bardow, A., Baum, C. M., Bolongaro, V., Dufour-Décieux, V., Esch, C. e*t al.* **(2025)**. An ecosystem of carbon dioxide removal reviews – part 1: direct air CO_2 capture and storage. *Energy & Environmental Science,* 18, 9713–9785. https://doi.org/10.1039/D5EE01732G.

van Ruijven, B.J., De Cian, E. and Sue Wing, I. (2019). Amplification of future energy demand growth due to climate change. *Nature Communications*, 10, 2762. https://doi.org/10.1038/s41467-019-10399-3.

Van Tricht, L., Zekollari, H., Huss, M., Rounce, D.R., Schuster, L., Aguayo, R. *et al.* **(2025)**. Peak glacier extinction in the mid-twenty-first century. *Nature Climate Change*. Advance online publication. https://doi.org/10.1038/s41558-025-02513-9.

van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K. *et al.* **(2011)**. The representative concentration pathways: An overview. Climatic Change, 109, 5–31. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z.

Velasquez Casallas, L.M., Khelidj, N., Morán-Ordóñez, A. and Losapio, G. (2025). Global impacts of glacier retreat on ecosystem services provided by soil and vegetation in mountain regions: A literature review. *Ecosystem Services,* 73, 101730. https://doi.org/10.13130/RD_UNIMI/LWIOZV.

Veldman, J.W., Overbeck, G.E., Negreiros, D., Mahy, G., Le Stradic, S., Fernandes, G.W. *et al.* **(2015)**. Where tree planting and forest expansion are bad for biodiversity and ecosystem services. *BioScience*, 65(10), 1011–1018. https://doi.org/10.1093/biosci/biv118.

Venner, K., García-Lamarca, M. and Olazabal, M. (2024). The Multi-Scalar Inequities of Climate Adaptation Finance: A Critical Review. *Current Climate Change Reports*. https://doi.org/10.1007/s40641-024-00195-7.

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 137

Vicedo-Cabrera, A.M., Guo, Y., Sera, F., Huber, V., Schleussner, C.-F., Mitchell, D. *et al.* **(2018)**. Temperature-related mortality impacts under and beyond Paris Agreement climate change scenarios. *Climatic Change*, 150, 391–402. https://doi.org/10.1007/s10584-018-2274-3.

Vidal Junior, J. de D., Antonelli, A., Carbutt, C., Clark, V.R., Fremout, T., Chapano, C. *et al.* **(2025)**. Late 21st-century climate and land use driven loss of plant diversity in African mountains. *Global Change Biology*, 31(9), e70492. https://doi.org/10.1111/gcb.70492.

Vinichenko, V., Cherp, A. and Jewell, J. (2021). Historical precedents and feasibility of rapid coal and gas decline required for the 1.5°C target. *One Earth*, 4(10), 1477–1490. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.09.012.

Vogel, C. and O'Brien, K. (2021). Getting to the heart of transformation. *Sustainability Science*, 16, 1835–1840. https://doi.org/10.1007/s11625-021-01016-8.

Voigt, C., Sauter, P., Guerreiro Teixeira, R., Rogelj, J., Schleussner, C.-F. and Sulyok, K. (2025). The legal power of highest possible ambition: Setting legal and scientific indicators to assess highest possible ambition under Article 4(3) of the Paris Agreement. *Climate Law*, 15(1–2), 7–30. https://doi.org/10.1163/18786561-bja10063.

Vousdoukas, M.I., Athanasiou, P., Giardino, A., Mentaschi, L., Stocchino, A., Kopp, R. E. *et al.* **(2023)**. Small Island Developing States under threat by rising seas even in a 1.5 °C warming world. *Nature Sustainability, 6,* 1552–1564. https://doi.org/10.1038/s41893-023-01230-5.

Waddock, S., Waddell, S., Goldstein, B., Linner, B., Schäpke, N. and Vogel, C. (2020). Transformation: How to spur radical change. In A. Scrutton (Ed.), *Our Future on Earth Report* . Our Future on Earth. https://www.colorado.edu/envd/sites/default/files/attached-files/waddock_et_al_how_to_spur_radical_change.pdf.

Waidelich, P., Batibeniz, F., Rising, J., Kikstra, J.S. and Seneviratne, S.I. (2024). Climate damage projections beyond annual temperature. *Nature Climate Change*, 14, 592–599. https://doi.org/10.1038/s41558-024-01990-8.

Walton, J. and Huntingford, C. (2024). Little evidence of hysteresis in regional precipitation, when indexed by global temperature rise and fall in an overshoot climate simulation. *Environmental Research Letters*, 19(8), 084028. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad60de.

Wang, Y., Fang, M., Lou, Z., He, H., Guo, Y., Pi, X. *et al.* **(2024)**. Methane emissions from landfills differentially underestimated worldwide. *Nature Sustainability*, 7, 496–507. https://doi.org/10.1038/s41893-024-01307-9.

Wannewitz, M., Ajibade, I., Mach, K.J. Magnan, A., Petzold, J., Reckien, D. *et al.* **(2024)**. Progress and gaps in climate change adaptation in coastal cities across the globe. *Nature Cities, 1*(9), 610–619. https://doi.org/10.1038/s44284-024-00106-9.

Williams, A.P., Livneh, B., McKinnon, K.A., Hansen, W.D., Mankin, J.S., Cook, B.I. *et al.* **(2022)**. Growing impact of wildfire on western US water supply. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 119*(10), e2114069119. https://doi.org/10.1073/pnas.2114069119.

Williams, E., Funk, C., Peterson, P. and Tuholske, C. (2024). *High resolution climate change observations and projections for the evaluation of heat-related extremes*. *Scientific Data, 11*, 261. https://doi.org/10.1038/s41597-024-03074-w.

Winkelmann, R., Garbe, J., Donges, J.F. and Albrecht, T. (2026). Mapping tipping risks from Antarctic ice basins under global warming. *Nature Climate Change, 16,* 341–349. https://doi.org/10.1038/s41558-025-02554-0.

Wong, T. and Mackres, E. (2024). *City-scale, city-relevant climate hazard indicators under 1.5°C, 2.0°C, and 3.0°C of global warming*. Technical Note. World Resources Institute. https://doi.org/10.46830/writn.23.00154.

World Agriculture Forum [WAF] (2025). *Women in agriculture: Roles, challenges, and opportunities*. World Agriculture Forum. https://worldagricultureforum.org/public/assets/images/knowledge-center/Report-%20Women%20in%20agriculture.pdf.

World Bank Group (2022a). *Argentina Country Climate and Development Report*. Washington, DC. https://doi.org/10.1596/38252.

World Bank Group (2022b). *Ghana Country Climate and Development Report*. Washington, DC. https://doi.org/10.1596/38209.

World Bank Group (2022c). Iraq Country Climate and Development Report. Washington, DC: World Bank. https://doi.org/10.1596/38250.

World Bank Group (2022d). Pakistan Country Climate and Development Report. Washington, DC: World Bank. https://doi.org/10.1596/38277 .

World Bank Group (2023a). Côte d'Ivoire Country Climate and Development Report. Washington, DC: World Bank. https://doi.org/10.1596/40560.

World Bank Group (2023b). Colombia Country Climate and Development Report. Washington, DC: World Bank. https://doi.org/10.1596/40056. .

Processo 5069002-52.2026.4.04.7100/RS, Evento 1, ANEXO12, Página 138

World Bank Group (2024a). *Ethiopia Country Climate and Development Report*. Washington, DC. https://doi.org/10.1596/41114.

World Bank Group (2024b). *Maldives Country Climate and Development Report*. Washington, DC. https://doi.org/10.1596/41729.

World Bank Group (2024c). Guinea-Bissau Country Climate and Development Report. Washington, DC: World Bank. https://doi.org/10.1596/42283.

World Bank Group. (2025). Sri Lanka Country Climate and Development Report. Washington, DC: World Bank. https://doi.org/10.1596/43995

World Health Organization [WHO] and United Nations Children's Fund [UNICEF] (2025). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2024: Special focus on inequalities*. Geneva: WHO and UNICEF. https://data.unicef.org/wp-content/uploads/2025/09/jmp-2025-wash-households-launch.pdf.

World Meteorological Organization [WMO] (2020). *2020 State of Climate Services: Risk Information and Early Warning Systems*. WMO-No. 1252. Geneva: World Meteorological Organization. https://library.wmo.int/viewer/57191/download?file=1252_9-October_en.pdf&type=pdf&navigator=1.

World Meteorological Organization [WMO] (2026). *Global Annual to Decadal Climate Update 2026–2035*. Geneva: World Meteorological Organization. https://library.wmo.int/idurl/4/69882.

Wunderling, N., Willeit, M., Donges, J.F. and Winkelmann, R. (2020). Global warming due to loss of large ice masses and Arctic summer sea ice. *Nature Communications*, 11, 5177. https://doi.org/10.1038/s41467-020-18934-3.

Wunderling, N., Winkelmann, R., Rockström, J., Loriani, S., Armstrong McKay, D.I., Staal, A. *et al.* **(2023)**. Global warming overshoots increase risks of climate tipping cascades in a network model. *Nature Climate Change*, 13, 75–82. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01545-9.

Wunderling, N., Sakschewski, B., Rockström, J., Flores, B.M., Hirota, M., Staal, A. *et al.* **(2026)**. Deforestation-induced drying lowers Amazon climate threshold. *Nature, 654,* 114–120. https://doi.org/10.1038/s41586-026-10456-0.

Wyborn, C., Davila, F., Pereira, L., Lim, M., Alvarez, I., Henderson, G. *et al.* **(2020)**. Imagining transformative biodiversity futures. *Nature Sustainability, 3*(9), 670–672. https://doi.org/10.1038/s41893-020-0587-5.

Xia, P. and Gómez-Baggethun, E. (2026). Impacts of glacier retreat on ecosystem services and mountain communities: A case study in eastern Himalayas. *Ecosystem Services*, 77, 101790. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2025.101790.

Xu, X., Huang, A., Belle, E., De Frenne, P. and Jia, G. (2022). Protected areas provide thermal buffer against climate change. *Science Advances*, 8(44), eabo0119. https://doi.org/10.1126/sciadv.abo0119.

Xuan Hoy, Z., Woon, K.S., Chin, W.C., Fan, Y.N. and Yoo, S.J. (2023). Curbing global solid waste emissions toward net zero warming futures. *Science*, 382(6672), 797–800. https://doi.org/10.1126/science.adg3177.

Yalew, S.G., van Vliet, M.T.H., Gernaat, D.E.H.J., Ludwig, F., Miara, A., Park, C. *et al.* **(2020)**. Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios. *Nature Energy, 5*(10), 794–802. https://doi.org/10.1038/s41560-020-0664-z.

Yamamoto, K., DeVries, T. and Siegel, D.A. (2024). Metrics for quantifying the efficiency of atmospheric CO_2 reduction by marine carbon dioxide removal (mCDR). *Environmental Research Letters, 19*(10), 104053. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad7477.

Yang, P., Mi, Z., Wei, Y.-M., Hanssen, S. V., Liu, L.-C., Coffman, D. *et al.* **(2023)**. The global mismatch between equitable carbon dioxide removal liability and capacity. *National Science Review, 10*(12), nwad254. https://doi.org/10.1093/nsr/nwad254 .

Zekollari, H., Schuster, L., Maussion, F., Hock, R., Marzeion, B., Rounce, D.R. *et al.* **(2025)**. Glacier preservation doubled by limiting warming to 1.5°C versus 2.7°C. *Science, 388*(6750), 979–983. https://doi.org/10.1126/science.adu4675.

Zenios, S.A. (2022). The risks from climate change to sovereign debt. *Climatic Change*, 172, 30. https://doi.org/10.1007/s10584-022-03373-4.

Zhang, Z., Poulter, B., Wang, Z., Bruhwiler, L., Canadell, J.G., Gedney, N. *et al.* **(2026)**. Emergent constraints on future methane emissions from global wetlands. *Nature Geoscience, 19,* 654–659. https://doi.org/10.1038/s41561-026-01987-2.

Zhao, X., Mignone, B.K., Wise, M.A. and McJeon, H.C. (2024). Trade-offs in land-based carbon removal measures under 1.5 °C and 2 °C futures. *Nature Communications,* 15, 2297. https://doi.org/10.1038/s41467-024-46575-3.

Zhou, S., Meijers, A.J.S., Meredith, M.P., Abrahamsen, E.P., Holland, P.R., Silvano, A. *et al.* **(2023)**. Slowdown of Antarctic Bottom Water export driven by climatic wind and sea-ice changes. *Nature Climate Change*, 13, 701–709. https://doi.org/10.1038/s41558-023-01695-4.

Zickfeld, K., Azevedo, D., Mathesius, S. and Matthews, H.D. (2021). Asymmetry in the climate–carbon cycle response to positive and negative CO_2 emissions. *Nature Climate Change*, 11, 613–617. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01061-2.

Special thanks to UNEP's funding partners. For more than 50 years, UNEP has served as the leading global authority on the environment, mobilizing action through scientific evidence, raising awareness, building capacity and convening stakeholders. UNEP's core programme of work is made possible by flexible contributions from Member States and other partners to the Environment Fund and UNEP Planetary Funds. These funds enable agile, innovative solutions for climate change, nature and biodiversity loss, and pollution and waste.

Support UNEP. Invest in people and planet.
www.unep.org/funding

UN environment programme

www.unep.org
unep-communication-director@un.org

Responsabilidade ambiental-climática

*A **cadeia causal** entre emissões de GEE, agravamento do evento extremo e danos no Rio Grande do Sul*

01 Os gases de efeito estufa e o aquecimento global

Atividade humana → Temperaturas → Alteração das condições climáticas → Intensificação de eventos extremos

02 A Ré: contribuição histórica e imputação proporcional

A **Shell** é a **2ª maior produtora de óleo e gás,** detendo **10%** do mercado nacional.

A **Shell** é responsável por **2,02%** das **emissões globais** cumulativas de **combustíveis fósseis**

A Shell é uma **poluidora indireta, possuindo responsabilidade** na contribuição à degradação ambiental conforme Art. 3º, IV, Lei n. 6.938/81.

A atuação da Ré integra a cadeia econômica de exploração, produção e comercialização de combustíveis fósseis e contribui historicamente para a acumulação de GEE na atmosfera.

03 O evento climático extremo: Rio Grande do Sul, 2024

MUDANÇAS CLIMÁTICAS
Fator central e determinante que amplificou a intensidade e a severidade do evento extremo

ABRIL E MAIO DE 2024
Chuvas extremas e inundações de grande magnitude no RS

DANOS AO MEIO AMBIENTE E PESSOAS AFETADAS

04 A ciência da atribuição: nexo de causalidade

Três níveis de análise:

ATRIBUIÇÃO DO AQUECIMENTO
Atividades humanas → mudanças climáticas

ATRIBUIÇÃO DE FONTES
Grandes emissores → contribuição mensurável

ATRIBUIÇÃO DO EVENTO
Mudanças climáticas → aumento da probabilidade

As provas científicas atestam a responsabilidade da Shell pelo desastre no Rio Grande do Sul.

No caso do Rio Grande do Sul, estudo revisado por pares e publicado na revista Nature em janeiro de 2026, concluiu que **o aquecimento global antropogênico tornou o evento de precipitação extrema no Rio Grande do Sul**

2x mais provável e 12% mais intenso.

A CADEIA CAUSAL DO DESASTRE

Emissões históricas e acumuladas do grupo Shell → Contribuição para mudanças climáticas → Aumento do desequilíbrio do sistema climático e maior probabilidade e intensidade do desastre → Danos ambientais, materiais, sociais e econômicos

05 Danos materiais e morais coletivos

DANOS MATERIAIS

Esta demanda busca a reparação parcial do dano de forma **proporcional** à sua contribuição histórica para as emissões de GEE.

12% (intensificação do evento atribuída às mudanças climáticas) **x 2,02%** (participação histórica atribuída à ré nas emissões globais cumulativas) **= 0,2424%** (fator de atribuição material proposto)

Considerando **a base pública de R$ 111,6 bilhões,** estima-se que a parcela mínima da indenização atribuível à ré seja de:

R$ 270,5 milhões.

Sem prejuízo de atualização e apuração definitiva em liquidação de sentença.

DANOS MORAIS COLETIVOS

Impõe-se a reparação pelo dano moral coletivo estimado em:

R$ 270,5 milhões.

PÁGINA DE SEPARAÇÃO
(Gerada automaticamente pelo sistema.)

Evento 2

Evento:
REDISTRIBUIDO POR SORTEIO DE RSPOA09F PARA CEPLACC24C MOTIVO RESOLUCAO CONJUNTA 432024

Data:
09/10/2026 16:14:32

Usuário:
SECAUTOLOC - [AUTOMATIZAÇÃO] -

Processo:
5069002-52.2026.4.04.7100/RS

Sequência Evento:
2