



MUDANÇA DO CLIMA NO BRASIL

SÍNTSE ATUALIZADA E PERSPECTIVAS
PARA DECISÕES ESTRATÉGICAS



MUDANÇA DO CLIMA NO BRASIL

SÍNTESE ATUALIZADA E PERSPECTIVAS
PARA DECISÕES ESTRATÉGICAS



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL	REDE BRASILEIRA DE PESQUISAS SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS (REDE CLIMA)	INSTITUTO ALANA
PRESIDENTE DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL Luiz Inácio Lula da Silva	COORDENADOR CIENTÍFICO DA REDE CLIMA Moacyr Araújo	PRESIDENTE Ana Lucia de Mattos Barreto Villela
MINISTRA DE ESTADO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO Luciana Barbosa de Oliveira Santos	VICE-COORDENADOR CIENTÍFICO DA REDE CLIMA Jean Pierre Ometto	VICE-PRESIDENTES Alfredo Egydio Arruda Villela Filho Marcos Nisti
SECRETÁRIO EXECUTIVO Luis Manuel Rebelo Fernandes	WWF-BRASIL	DIRETORA-EXECUTIVA Isabella Henriques
SECRETÁRIA DE POLÍTICAS E PROGRAMAS ESTRATÉGICOS Andrea Brito Latgé	DIRETOR-EXECUTIVO Mauricio Voivodic	TESOUREIRO Daniel Costa
DIRETOR DO DEPARTAMENTO PARA O CLIMA E SUSTENTABILIDADE Osvaldo Luiz Leal de Moraes	DIRETOR DE CONSERVAÇÃO E RESTAURAÇÃO Edegar Oliveira	DIRETOR ADMINISTRATIVO- FINANCEIRO Carlos Vieira Júnior
COORDENADOR-GERAL DE CIÊNCIA DO CLIMA Márcio Rojas Da Cruz	DIRETORA DE ESTRATÉGIA Mariana Napolitano	DIRETOR DE POLÍTICAS E DIREITOS DAS CRIANÇAS Pedro Hartung
	ESPECIALISTAS EM CONSERVAÇÃO Alexandre Prado Helga Correa	DIRETORA DE PESSOAS E CULTURA Renata Lirio
		DIRETORA DE ESTRATÉGIA DE COMUNICAÇÃO Fernanda Flândoli

O relatório 'Mudança do Clima no Brasil - Síntese Atualizada e Perspectivas para Decisões Estratégicas' não é um produto do IPCC, não foi submetido a processos formais de revisão do IPCC e não foi endossado pelo IPCC.

As informações e ilustrações dos relatórios do IPCC do Sexto Ciclo de Avaliação (AR6) não são uma tradução do IPCC. Elas foram fornecidas pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), Rede Clima, WWF-Brasil e Alana, com o objetivo de refletir da forma mais precisa a linguagem utilizada no texto original.

Como um órgão das Nações Unidas, o IPCC publica seus relatórios nos seis idiomas oficiais da ONU (árabe, chinês, inglês, francês, russo e espanhol). As versões nesses idiomas estão disponíveis para download em www.ipcc.ch. Para obter mais informações, entre em contato com o Secretariado do IPCC (Endereço: 7bis Avenue de la Paix, C.P. 2300, 1211 Genebra 2, Suíça; e-mail: ipcc-sec@wmo.int).

**M943 Mudança do clima no Brasil: síntese atualizada e perspectivas para decisões
estratégicas / Cíntia de Albuquerque Wanderley Coelho ... [et al.] -- Brasília:
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2024.
106 p.: il.**

Obra elaborada em parceria com a Rede Clima
Apoio: WWF e Instituto Alana
ISBN: 978-65-5471-018-3 (versão digital)

1. Mudança climática – Impactos – Brasil. 2. Mudança climática – Mitigação –
Brasil 3. Clima – Brasil. I. Coelho, Cíntia de Albuquerque Wanderley.

CDU 551.583(81)

Ficha catalográfica elaborada por: Lorena Nelza F. Silva – CRB-1/2474

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)
Esplanada dos Ministérios, Bloco E, Telefone: 55 (61) 2033-7923
www.gov.br/mcti
70067-900 - Brasília - DF

Sumário

Lista de autores	5
Lista de colaboradores	5
Lista de siglas	6
Glossário	7
1. Prefácio	10
2. Ciência do clima	17
3. Nosso presente	25
Exposição socioeconômica e impactos	27
Oceano e Zona Costeira	28
Segurança energética	32
Saúde	34
Vulnerabilidade das comunidades	38
Migrações	42
Riscos e desastres	42
Agricultura	45
Biodiversidade e serviços ecossistêmicos	47
Financiamento	51
4. O que esperar para o “amanhã”	54
Clima futuro	55
Migrações humanas	58
Saúde humana	58
Comunidades vulneráveis	59
Agropecuária e segurança alimentar	59
Ecossistemas e biodiversidade	62
5. O que podemos fazer agora?	65
Contexto geral com enfoque no Brasil	66
5.1 Cenários de mitigação compatíveis com metas de longo prazo	68
5.2 Mitigação em setores-chave no curto e médio prazo	69
Energia	69
Transportes	70
Edificações e indústria	70
Ecossistemas e biodiversidade	71
Agricultura	72
Governança e políticas nacionais e subnacionais	73
Cooperação internacional	74
Inovação tecnológica, desenvolvimento e transferência de tecnologia	75
Aceleração da transição para o desenvolvimento sustentável	76
5.3 Medidas de adaptação	76
Manejo de ecossistemas	77
O papel das populações indígenas e comunidades tradicionais	78
Cidades	79
Riscos e desastres	81
Saúde	81
Agricultura	82
6. Considerações finais	84
Referências	87



LISTA DE AUTORES

Cíntia de Albuquerque Wanderley Coelho	Bolsista CNPq UERJ
Danielly Godiva Santana Molleta	Consultora
Jean Pierre Ometto	INPE – Rede Clima
Josicleá Pereira Rogério	Bolsista CNPq IFAL
Julia de Niemeyer Caldas	Bolsista CNPq UFRJ
Márcio Rojas da Cruz	MCTI
Margareth S. Copertino	FURG – Rede Clima
Moacyr Araújo	UFPE – Rede Clima
Sofia Caumo	Bolsista CNPq ENSP/Fiocruz

LISTA DE COLABORADORES

Alexandre Prado	WWF-Brasil
Alisson Barbieri	Rede Clima UFMG
Andrea Santos	COPPE UFRJ
Antônio Marcos Mendonça	MCTI
Carolina Maciel	Instituto Alana
Carolina Tarrio	Instituto Alana
Diogo Victor dos Santos	MCTI
Eduardo Valente Canina	WWF-Brasil
Flávia Martinelli	WWF-Brasil
Giselli Cavalcanti	WWF-Brasil
Gustavo Luedemann	Rede Clima IPEA
João Paulo Amaral	Instituto Alana
Jussara Rafael Angelo	Rede Clima ENSP/Fiocruz
Leticia Cotrim da Cunha	Rede Clima UERJ
Lincoln Alves	Rede Clima INPE
Marcel Bursztyn	Rede Clima UnB
Marcelle Souza	WWF-Brasil
Pedro Affonso Duarte Hartung	Instituto Alana
Rafael Magalhães Rabelo	UFOPA
Regina Célia dos Santos Alvalá	Rede Clima CEMADEN
Regina Rodrigues	Rede Clima UFSC
Ricardo Vieira Araújo	MCTI
Sandra Hacon	Rede Clima ENSP/Fiocruz
Sonia Regina Mudrovitsch de Bittencourt	MCTI
Stoécio Malta Ferreira Maia	Rede Clima IFAL



LISTA DE SIGLAS

- °C** – grau Celsius
- AR5** – Fifth Assessment Report (Quinto Relatório de Avaliação)
- AR6** – Sixth Assessment Report (Sexto Relatório de Avaliação)
- BECCS** – Biomass Energy with Carbon Capture and Storage
(Bioenergia com captura e armazenamento de carbono)
- C** – Carbono
- CCS** – Carbon Capture and Storage (Captura e armazenamento de carbono)
- CEMADEN** – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
- CH₄** – metano
- CNPq** – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
- CO** – monóxido de carbono
- CO₂** – dióxido de carbono
- CORSIA** – Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
(Esquema de Compensação e Redução de Carbono para Aviação Internacional)
- ENSO** – El Niño-Southern Oscillation
- ENSP** – Escola Nacional de Saúde Pública
- FIOCRUZ** – Fundação Oswaldo Cruz
- FURG** – Universidade Federal do Rio Grande
- GASES F** – gases fluorados
- GEE** – gás de efeito estufa
- GT** – gigatonelada
- HA** – hectare
- IFAL** – Instituto Federal de Alagoas
- INPE** – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- IPCC** – Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima)
- IPEA** – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
- KM²** – quilômetro quadrado
- MCTI** – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
- MP** – Material particulado atmosférico
- NDC** – National determined contributions (Contribuições nacionalmente determinadas)
- NES** – Nordeste da América do Sul
- N₂O** – Óxido nitroso
- OACI** – Organização da Aviação Civil Internacional
- OCM** – Ondas de Calor Marinhas
- ODS** – Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável
- REDD+** – Redução de Emissões Provenientes de Desmatamento e
Degradação Florestal + conservação dos estoques de carbono, manejo
sustentável e aumento dos estoques de carbono florestal
- REDE CLIMA** – Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas
- SES** – Sudeste da América do Sul
- SOYM** – Soy moratorium (Moratória da Soja)
- TG** – Teragrama
- UERJ** – Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UFMG** – Universidade Federal de Minas Gerais
- UFPE** – Universidade Federal de Pernambuco
- UFRJ** – Universidade Federal do Rio de Janeiro
- UFSC** – Universidade Federal de Santa Catarina
- UNB** – Universidade de Brasília
- US\$** – Dólares americanos



GLOSSÁRIO

ACORDO DE PARIS	Acordo intergovernamental lançado durante a Convenção do Clima de 2015 (COP 2015), que estrutura ações locais, nacionais e do setor privado alinhadas às metas de longo prazo de redução de GEE, e também de mitigação, adaptação e finanças. Para mitigação, o acordo exige a manutenção do aumento das temperaturas médias globais bem abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, mas ao mesmo tempo fazer esforços para limitar esse aumento da temperatura média a 1,5°C e zerar as emissões líquidas de gases de efeito estufa (GEE) até a metade deste século. Para adaptação, o acordo exige o aumento da habilidade de adaptação às mudanças climáticas e fomento à resiliência climática. Para as finanças, o acordo busca tornar os fluxos financeiros coerentes com um caminho de desenvolvimento resiliente ao clima, com baixas emissões de GEE. O acordo determina também que os países desenvolvidos deverão investir US\$ 100 bilhões por ano em medidas de combate às mudanças climáticas em países em desenvolvimento.
ADAPTAÇÃO	Em sistemas humanos, é o processo de ajustes ao clima atual ou esperado e aos seus efeitos, a fim de moderar os danos ou explorar as oportunidades benéficas. Em sistemas naturais, é o processo evolutivo em que os organismos ou populações se ajustam ao clima atual ou esperado; a intervenção humana pode facilitar esse processo.
ADAPTAÇÃO BASEADA EM ECOSISTEMAS (ABE)	É um tipo de solução baseada na natureza, definida como o uso de atividades de manejo de ecossistemas para aumentar a resiliência e reduzir a vulnerabilidade das pessoas e ecossistemas às mudanças climáticas.
BIOCOMBUSTÍVEL	Derivados de biomassa renovável que podem substituir, parcial ou totalmente, combustíveis derivados de combustíveis fósseis como petróleo e o gás.
BIOENERGIA	Energia obtida da biomassa que pode ser utilizada para gerar calor, eletricidade ou biocombustíveis.
CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO (CCS)	Tecnologia capaz de reter/capturar o CO ₂ emitido por combustão ou processos industriais e armazená-lo em formação geológica ou aproveitado industrialmente.
CÉLULA DE HADLEY	Modelo de circulação fechada da atmosfera terrestre predominante nas latitudes equatoriais e tropicais, vinculadas aos ventos alísios, às zonas tropicais úmidas, desertos subtropicais e correntes de jato.
CORSIA	Programa da Organização da Aviação Civil Internacional (Oaci) para a redução e compensação de emissões de CO ₂ provenientes dos voos internacionais.



EL NIÑO	Fenômeno acoplado atmosférico-oceânico que se refere às situações nas quais o oceano Pacífico Equatorial está mais quente do que a condição média histórica (climatológica).
EXPOSIÇÃO	Exposição é a presença de pessoas, meios de subsistência, espécies ou ecossistemas, funções ambientais, serviços e recursos, infraestrutura ou bens econômicos, sociais ou culturais em localidades que podem ser adversamente afetadas.
FAUNA DEMERSAL	Organismos, em particular peixes, que vivem a maior parte do tempo no fundo do mar, em associação com o substrato, quer em fundos arenosos, como os linguados, quer em fundos rochosos, como as garoupas.
MARISCAGEM	A mariscagem é uma tarefa que faz parte da pesca artesanal. O ofício de mariscar consiste na captura e beneficiamento de animais aquáticos como siris, caranguejos, ostras, aratus, entre outros mariscos.
MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO	Mistura de partículas líquidas e sólidas dispersas no ar, com diâmetro e composição variada, podendo permanecer suspensas na atmosfera entre alguns segundos e semanas.
MORATÓRIA DA SOJA	Acordo que assegura que a soja produzida na Amazônia e comercializada pelos seus signatários esteja livre de desflorestamentos.
MORTE PROGRESSIVA DA FLORESTA	Fenômeno em que um conjunto de árvores perde sua saúde e morre progressivamente.
OACI	Agência especializada das Nações Unidas para gerenciar a administração e a governança da Convenção de Chicago, sendo responsável pela promoção do desenvolvimento seguro e ordenado da aviação civil mundial.
REDD+	Redução de Emissões Provenientes de Desmatamento e Degradação Florestal (REDD) e que também inclui a conservação e o aumento dos estoques de carbono florestal e o manejo sustentável das florestas. Mecanismo de compensação financeira para países em desenvolvimento por seus resultados positivos de redução de GEE provenientes do desmatamento e da degradação florestal, do manejo sustentável e aumento dos estoques de carbono florestal
RISCO	Potencial dos sistemas ecológicos ou humanos de sofrer consequências adversas, tendo em vista a diversidade de valores e objetivos associados a tais sistemas.

SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA (SBN) Definidas pela IUCN como ações para proteger, manejar sustentavelmente e restaurar ecossistemas naturais ou modificados, que promovam ao mesmo tempo o bem-estar humano e benefícios para a biodiversidade.

SUMIDOURO DE CARBONO Um sumidouro de carbono é qualquer sistema que acumula e estoca compostos químicos de carbono (orgânico ou inorgânico) por tempo muito longo ou indeterminado e, portanto, removendo substancialmente o CO₂ da atmosfera. O sumidouro é um tipo de estoque que sequestra maiores quantidades de carbono (CO₂) do que emite. Os maiores sumidouros de carbono do planeta são as florestas, o oceano e o solo. As emissões brutas são tudo o que é emitido, enquanto as emissões líquidas consideram o balanço entre as emissões e o carbono que é removido da atmosfera pela vegetação, por exemplo.

TROPICALIZAÇÃO Ato de adaptar aos trópicos, de tropicalizar.

UNIDADE DE CONSERVAÇÃO (UC) O Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) define unidade de conservação (UC) como o espaço territorial e seus recursos ambientais, com características naturais relevantes, legalmente instituído pelo poder público, com objetivos de conservação e limites definidos, sob regime especial de administração, ao qual se aplicam garantias de proteção. As unidades de conservação estão organizadas em dois grupos: 1. Unidades de Proteção Integral – têm a finalidade de preservar a natureza, sendo admitido apenas o uso indireto dos recursos naturais, com regras e normas restritivas; 2. Unidades de Uso Sustentável – conciliam a conservação da natureza com o uso sustentável de parte dos recursos naturais.

VENTOS ALÍSIOS Ventos regulares e constantes que sopram o ano todo de leste para oeste, dos subtrópicos em direção ao Equador, formados pela diferença de pressão do ar entre essas regiões. Devido ao movimento de rotação da Terra, no hemisfério Sul os alíseos sopram de sudeste, enquanto no hemisfério Norte sopram de nordeste. Os alíseos fazem parte da célula de Hadley, que é uma das três células de macrocirculação atmosférica e que está situada na faixa intertropical

VENTOS EXTRATROPICIAIS São sistemas de baixa pressão caracterizados por forte vento e precipitação, formados em regiões de médias e baixas latitudes, isto é, fora da região tropical, normalmente entre as latitudes 30° e 60° do hemisfério.

VULNERABILIDADE Vulnerabilidade é a propensão ou predisposição de uma população ou sistema ser adversamente afetado e abrange uma variedade de conceitos e elementos, incluindo sensibilidade ou susceptibilidade a danos e falta de capacidade para enfrentar ou se adaptar.

1

PREFÁCIO

Este documento parte da síntese dos aspectos relevantes ao Brasil contidos no 6º Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) e avança, em vários aspectos, para o mais atual conhecimento acerca do desafio que a mudança do clima representa para o Brasil.

O CLIMA, OS ECOSISTEMAS e a sociedade humana estão conectados entre si de diversas formas. Por isso, as mudanças climáticas podem causar impactos e riscos para diferentes regiões, sistemas e setores socioeconômicos. A evolução da relação humana com a natureza proporcionou abundantes benefícios para a sociedade; entretanto, esse estreito laço originou também inúmeros impactos negativos, como mudanças substanciais nos ambientes terrestres e aquáticos, perda de biodiversidade, mudanças no clima local e regional, entre outros.

O início da Era Industrial, no século XVIII, foi um marco para a história mundial, tanto pelo desenvolvimento de novas tecnologias, como pela mudança nos padrões de consumo da sociedade, que passou a demandar cada vez mais recursos naturais, aumentando substancialmente a amplitude dos impactos ambientais. Um dos impactos relacionados ao desenvolvimento contemporâneo da sociedade foi o aumento nas emissões de gases alterando, globalmente, as proporções da composição da atmosfera. Os chamados gases de efeito estufa (GEE), relevantes ao balanço de energia da Terra, tiveram suas emissões ampliadas exponencialmente, desde 1750, derivadas inequivocamente de atividades humanas como: produção de energia, indústria, transportes e mudança no uso e cobertura da terra (por exemplo, o desmatamento, a agricultura, a urbanização, a drenagem de áreas úmidas, entre outros). A queima de combustíveis fósseis é o maior propulsor das alterações na atmosfera. De acordo com o relatório do IPCC, no período de 2010 a 2019, 79% das emissões globais de GEE vieram dos setores energia, indústria, transporte e construções,

enquanto entre 13% e 21% vieram da agricultura, atividades florestais e outros usos da terra (AFOLU); em 2019, as concentrações de CO₂ na atmosfera (410 ppm) foram maiores que em qualquer período dos últimos 2 milhões de anos, e as concentrações de metano (1.866 ppb) e óxido nitroso (33 ppb) foram maiores que em qualquer período nos últimos 800 mil anos.

As emissões globais de gases de efeito estufa (CO₂+CH₄+N₂O e gases F) aumentaram 1,3% de 2022 para 2023, chegando a 57,1 GtCO₂e (gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente), um novo recorde anual (UNEP, 2024). As emissões de CO₂ provenientes da queima de combustíveis fósseis (39 GtCO₂) continuam representando a maior parte das emissões totais (68%). As emissões de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O e gases F), que têm maiores potenciais de aquecimento global, foram 9,8 GtCO₂e, 2,6 GtCO₂e e 1,7 GtCO₂e, respectivamente. As emissões de GEE e remoções de CO₂ do LULUCF continuam a ter as maiores incertezas de todos os gases considerados, mas as estimativas para emissões líquidas de CO₂ para esse setor foram de 4 GtCO₂ (UNEP, 2024). Dado o aumento exponencial das taxas de emissões de carbono, 50% das emissões históricas de CO₂ ocorreram nos últimos 30 anos (www.globalcarbonproject.org/).

Esses valores de emissões ainda estão muito longe da redução necessária para alcançar as metas climáticas globais (Friedlingstein *et al.*, 2023). A concentração média de CO₂ atmosférico alcançaria 419,3 ppm em 2023, segundo as previsões, valor 51% acima do nível pré-industrial. Em maio de 2024, a média global de concentração de CO₂ atmosférico alcançada foi cerca de 423 ppm (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Os últimos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) chamam a atenção para o fato de que a influência humana sobre o clima é inequívoca, sendo a causa do aquecimento da atmosfera, dos oceanos e continentes. Ainda que de forma desigual, a mudança climática já está afetando cada região do planeta, causando impactos adversos, perdas e danos para a natureza e para as pessoas. As comunidades mais vulneráveis e que menos contribuíram historicamente com a mudança climática são desproporcionalmente as mais afetadas. Dessa maneira, cabe às nações e a todos os setores da sociedade a complexa missão de reduzir as emissões de GEE e manter o aquecimento global dentro de limites sustentáveis para o planeta.

No âmbito do Acordo de Paris firmado em 2015, um número crescente de países tem se comprometido com metas de zerar emissões líquidas de dióxido de carbono. Porém, para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C, os compromissos precisam ser rapidamente convertidos em políticas e ações concretas e efetivas. Em 2018, o IPCC destacou a escala sem precedentes

do desafio necessário para manter o aumento da temperatura da superfície da Terra abaixo desse nível. Seis anos depois, esse desafio torna-se ainda maior, uma vez que os compromissos assumidos por cada país precisam ser mais ambiciosos para que a necessária redução nas emissões seja atingida: 43% até 2030 ou 69% até 2040, ambos em relação aos níveis de emissão de 2019 (IPCC, 2023).

O Brasil desempenha um papel crítico no alcance dessas metas, devido principalmente à sua importante cobertura florestal. Entre 2013 e 2022, as maiores taxas de emissões líquidas de CO₂ oriundas da mudança no uso do solo foram do Brasil (1,1 bilhão de toneladas de CO₂ por ano), que contribuiu com 21% das emissões globais líquidas nesse setor, seguido pela Indonésia (19,9%) e República Democrática do Congo (12,2%) (Friedlingstein *et al.*, 2023). As altas emissões provocadas por essas atividades apontam o grande potencial das ações de proteção florestal (zerar desmatamento) na redução das emissões globais.

O relatório do IPCC AR6 destaca que o aumento da temperatura média da superfície da Terra no período de 2011 a 2020, em relação ao período de 1850 a 1900, foi de 1,09°C (variação de 0,95°C a 1,20°C). Dados mais recentes, 2013-2022, reforçam a tendência de aumento, com valores que alcançaram 1,13 a 1,17°C acima do nível pré-industrial (European Environmental Agency, 2023). O aumento na temperatura média da atmosfera resulta em eventos climáticos extremos mais frequentes, mais intensos e de maior abrangência espacial (como ondas de calor, secas, chuvas intensas, inundações), com impactos cada vez mais nocivos para as pessoas e para a natureza. Cada incremento no aquecimento global deverá intensificar perigos e riscos múltiplos em todas as regiões do globo, ameaçando diversos setores produtivos e essenciais (como, por exemplo, a produção de alimentos, assegurando a segurança hídrica e energética) e as pessoas, diretamente, na saúde física e mental, no risco de morte por desastres etc.

O sexto ciclo de trabalho do IPCC produziu diversos documentos que contribuíram ao Sexto Relatório de Avaliação (AR6): três Relatórios de Avaliação dos Grupos de Trabalho (GT), mais o relatório síntese (AR6 – SYR). Adicionalmente, foram produzidos três relatórios especiais que contribuíram ao AR6, mais um refinamento de seu último Relatório de Metodologia para os Inventários Nacionais de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (IPCC, 2019). Os três Grupos de Trabalho do IPCC têm enfoques distintos e consideram, respectivamente, GT1: as Bases Científicas para a Ciência do Clima; GT2: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade; e GT3: Mitigação. Os três relatórios especiais produzidos no ciclo VI foram: 1) *Global warming of 1.5°C (SR*

1,5; 2018); 2) *Climate Change and Land* (SRCCL; 2019) e 3) *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (SROCC; 2019). O relatório síntese (AR6-SYR), lançado em março de 2023 (IPCC 2023), concluiu o AR6, sintetizando e integrando os relatórios de avaliações dos três GT's, complementadas pelas informações dos relatórios especiais. Cada ciclo de avaliação do IPCC dura em média sete anos. Portanto, o conteúdo compilado a partir de milhares de publicações científicas e técnicas pode ser utilizado como referência do conhecimento global por quase uma década, até que seja atualizado em um próximo ciclo de avaliação.

O AR6 do IPCC apresenta análises e afirmações-chave para 11 regiões de referência no mundo, sendo que cinco abrangem o território brasileiro (Figura 1). O AR6 indica que, no hemisfério Sul, os maiores aumentos de temperatura devem ocorrer nas áreas subtropicais da América do Sul. Os países da América do Sul, incluindo o Brasil, são altamente vulneráveis e expostos aos impactos e riscos relacionados às mudanças climáticas. Tal situação agrava-se pelo cenário de desigualdade social, pobreza, infraestrutura inadequada e densidade populacional (sobretudo em áreas urbanas), mudanças no uso do solo, desmatamento, perda de biodiversidade, degradação do solo e alta dependência da economia em recursos naturais para a produção de commodities agrícolas.

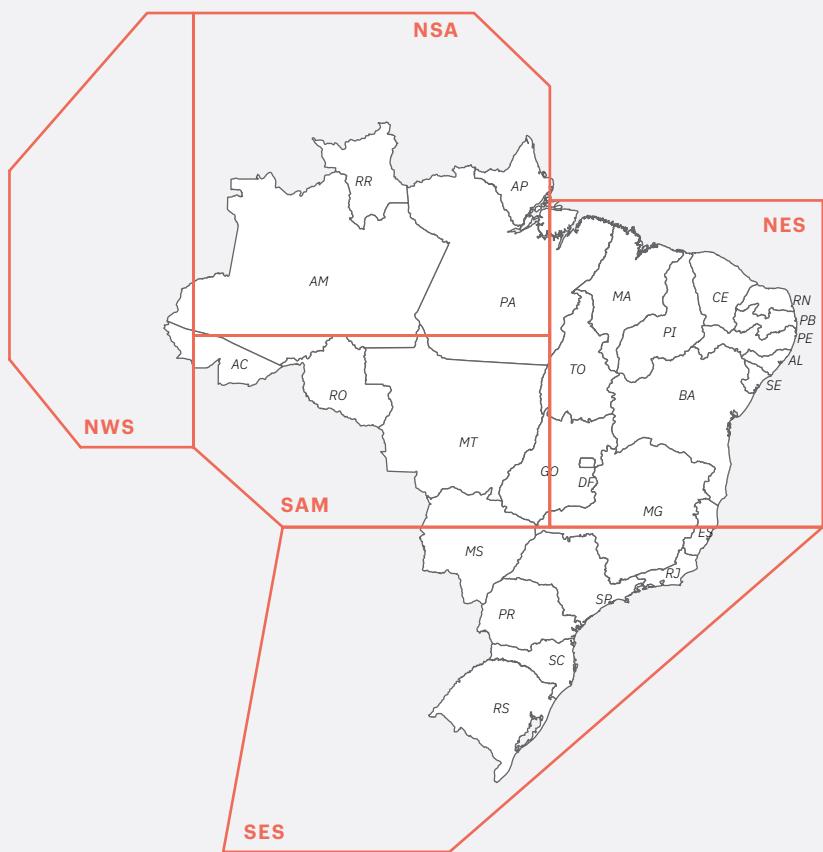


FIGURA 1:
Regiões terrestres referências do IPCC AR6
que contemplam o Brasil:

Noroeste Sul (NWS), Norte da América do Sul (NSA), Nordeste da América do Sul (NES), Monção Sul-Americana (SAM) e Sudeste da América do Sul (SES). Estados brasileiros: Amazônia (AM), Acre (AC), Rondônia (RO), Roraima (RR), Amapá (AP), Mato Grosso (MT) Tocantins (TO), Maranhão (MA), Piauí (PI), Ceará (CE), Rio Grande do Norte (RN), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE), Bahia (BA), Minas Gerais (MG), Espírito Santo (ES), Rio de Janeiro (RJ), São Paulo (SP), Goiás (GO), Distrito Federal (DF), Mato Grosso do Sul (MS), Paraná (PR), Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS). [Desenvolvido pelos autores].

A realidade atual, imposta pela mudança do clima, exige a integração de medidas de adaptação com ações de mitigação das emissões de GEE, de forma a reduzir o risco e proporcionar benefícios mais amplos. Os relatórios destacam ser necessário buscar modelos de desenvolvimento que sejam mais resilientes às mudanças nos padrões climáticos que vêm sendo observados. Alguns pontos importantes a serem considerados são a universalização do acesso à energia e tecnologias limpas; medidas de redução dos impactos à saúde, considerando particularmente populações e extratos sociais mais vulneráveis; o incentivo à eletrificação de baixo carbono; mobilidade urbana, considerando meios de transporte com baixa emissão de poluentes e redução na emissão de carbono; resgate da relação mais próxima com a natureza, com a implementação de parques

urbanos, tratamento de efluentes e melhoria da qualidade da água de mananciais, além de várias outras medidas que reduzam e mitiguem os impactos das mudanças climáticas e contribuam às ações de adaptação.

Outro ponto destacado pelo IPCC é a necessidade de aumentar o financiamento para países em desenvolvimento, visando promover e acelerar ações para atingir as metas climáticas globais, com benefícios locais e regionais. Através do financiamento público e sinais claros aos investidores, os governos podem reduzir as barreiras econômicas e promover importantes fluxos de recursos aos países em desenvolvimento para que tomem as necessárias ações de mitigação e adaptação. Investidores e bancos privados, empresas nacionais e globais que busquem convergência com padrões de sustentabilidade ambiental e social são também importantes atores na promoção de ações que contribuam à transição sustentável nos países em desenvolvimento. Além disso, o compromisso político, as políticas coordenadas, a cooperação internacional, a gestão de ecossistemas e a governança inclusiva são importantes para uma ação climática eficaz e equitativa. Se a tecnologia, o conhecimento e as medidas políticas adequadas forem compartilhadas, aliadas ao financiamento compatível com essas necessidades, todas as comunidades poderão contribuir na redução das emissões ou evitar processos e consumo de produtos com alta pegada de carbono. Ao mesmo tempo, com investimentos significativos em adaptação, será possível evitar ou minimizar riscos crescentes, especialmente para grupos e regiões vulneráveis.

Para a produção deste documento, revisaram-se os conteúdos dos relatórios dos três GTs, do Relatório Síntese e dos Relatórios Especiais que foram publicados no sexto ciclo de avaliação do IPCC, compilando as avaliações alusivas especificamente ao Brasil. O levantamento das informações foi feito a partir de uma lista de palavras-chave e de temas de interesse conforme o contexto e as circunstâncias nacionais. Foram diretamente envolvidos nessa produção os membros da equipe do WWF-Brasil, do Instituto Alana, do MCTI e da Rede Clima.

O principal objetivo foi primeiro mapear o conteúdo técnico-científico dos documentos, identificando suas principais implicações para o país, buscando oferecer subsídios aos tomadores de decisão de áreas diversas, com mensagens diretas, objetivas e de fácil compreensão. Segundo, buscaram-se, pontualmente, informações complementares produzidas pela ciência nacional e internacional, dentro do contexto regional da América do Sul e do Brasil (incluindo informações relativas ao Atlântico Sul). Portanto, esse documento traz uma síntese dos resultados científicos recentes, com foco em dados e informações que determinem o impacto da mudança do clima no país e as ações necessárias para gerenciar os desafios da agenda climática de maneira mais efetiva.

2

CIÊNCIA DO CLIMA

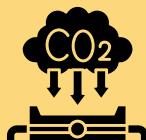
Este item compila as informações do relatório do Grupo de Trabalho 1 do AR6 com enfoque no território nacional e acrescenta, pontualmente, informações científicas pertinentes extraídas de outras publicações.



- Algumas consequências do aquecimento global já são irreversíveis, como o derretimento das geleiras e calotas polares, o aumento do nível do mar e o aquecimento dos oceanos.
- A temperatura global em 2081-2100 será, muito provavelmente, 1°C a 1,8°C mais alta do que no período de 1850-1900, considerando o melhor cenário de emissões de GEE; no pior cenário, o aumento da temperatura poderá ser de 3,3°C a 5,7°C.
- Eventos extremos, como secas severas e ondas de calor, serão mais frequentes, com probabilidade de ocorrência de eventos climáticos sem precedentes.



- É inequívoca a influência humana no aquecimento da atmosfera, dos oceanos e da superfície terrestre. Considerando o aquecimento de 1,09°C observado entre 2011 e 2020, em comparação com o período pré-industrial (1850-1900), conclui-se que o aumento de 1,07°C deriva de ações humanas, como a queima de combustíveis fósseis e conversão de áreas naturais em outros usos (por exemplo, desmatamento).



- Limitar o aquecimento global em qualquer nível requer no mínimo que as emissões líquidas de CO₂ sejam zeradas até 2050 e que outros gases de efeito estufa, como o metano, sejam substancialmente reduzidos.

- As tendências das temperaturas máximas diárias observadas nos últimos 60 anos (1961 a 2020) no Brasil apontam que já houve aumento de até 3 graus em várias regiões do país, revelando um aquecimento maior que a média global.

- Estudos de atribuição de eventos extremos para o Brasil, como ondas de calor, chuvas intensas e secas, indicam claramente a influência das mudanças climáticas na probabilidade de ocorrência e magnitude desses eventos.



- O aumento da ocorrência de eventos extremos atinge de forma mais dramática as regiões mais pobres e comunidades mais vulnerabilizadas, que já enfrentam sérios problemas sociais. As consequências das mudanças climáticas sobre a saúde pública vêm se mostrando mais graves, mas ainda demandam estudos específicos nas diversas regiões do Brasil. No entanto, o risco de surgimento de novas áreas de transmissão, principalmente para dengue, zika e chikungunya, já é uma realidade (como observado recentemente no Brasil). Há necessidade de planejamento e preparação do sistema de saúde para enfrentamento de surtos e epidemias, desde adequação da infraestrutura e capacitação de profissionais ao desenvolvimento e uso de novas ferramentas de previsão dos impactos das mudanças climáticas sobre os vetores dessas doenças.



- Pela primeira vez, estimativas regionalizadas para os próximos 30 anos são apresentadas em um Relatório de Avaliação do IPCC, a fim de balizar ações de adaptação. Todas as regiões do planeta sofrerão mudanças do clima nesse período, incluindo aumento da temperatura, ocorrência de estações quentes prolongadas, ondas de calor mais intensas e extremos de frio menos pronunciados. Em 2050, se o limite de 2°C for atingido, limiares críticos para a saúde humana e a agricultura serão ultrapassados com mais frequência.

O IPCC CONSTATOU em seu AR6 que, entre 2002 e 2019, houve uma tendência de aquecimento em todas as latitudes, com exceção dos polos, sendo mais acelerado nas regiões tropicais. Observou-se tendência de redução significativa da precipitação na América do Sul e mudanças nos padrões de vento ao longo dos anos. Nas últimas décadas, o número de ciclones extratropicais aumentou no hemisfério Sul, ao mesmo tempo que foi observada alteração na direção dos ventos extratropicais em ambos os hemisférios desde a década de 1980.

Estudos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) revelam que nas últimas quatro décadas o número de períodos secos tem aumentado em grande parte do Brasil, em particular nas regiões Centro-Oeste, Nordeste, sudeste da Amazônia e no Sudeste, ressaltando a vulnerabilidade do país aos extremos climáticos. Na Figura 2, nota-se que valores de Dias Consecutivos Secos (CDD, na sigla em inglês), que, em média, eram de aproximadamente 80 dias no período de referência (1961-1990) sobre o Nordeste do Brasil, aumentaram para cerca de 100 dias no período mais recente. Um retrospecto indica que secas prolongadas e suas consequências foram registradas na Amazônia em 2005, 2010 e 2023, no Nordeste de 2012 a 2015 e no Sudeste em 2001, 2014/2015 e 2020/2021.

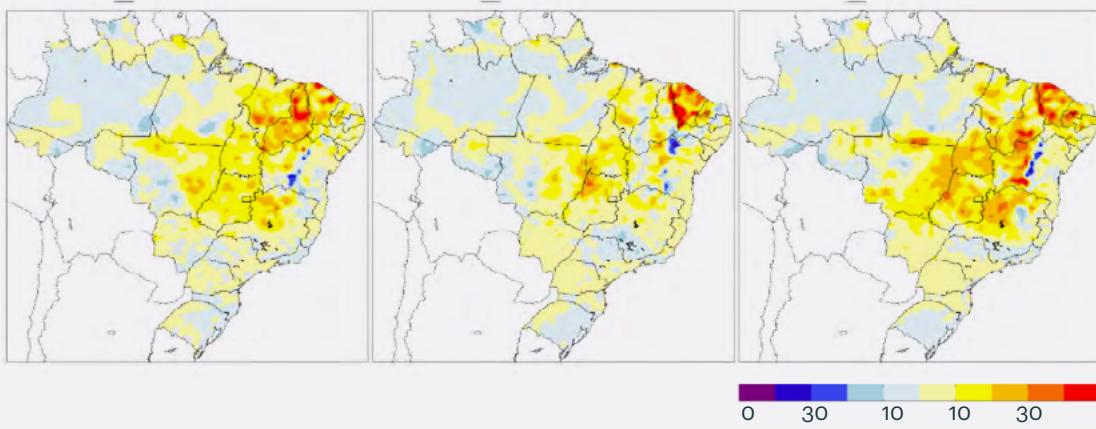


FIGURA 2: Anomalias de Dias Consecutivos Secos (CDD) observadas para três períodos: 1991-2000, 2001-2010 e 2011-2020, usando o período de 1961-1990 como referência. L.Alves et al., DIIAV/INPE.

A partir da análise dos extremos de temperatura máxima, o estudo avaliou o índice de ondas de calor (WSDI) no país. Observou-se um aumento gradual das anomalias de WSDI com o passar das décadas, para praticamente todo o território brasileiro (Figura 3). No período de referência (1961-1990), o número de dias com ondas de calor não passava de sete. Esse número subiu para 20 dias de 1991 a 2000, para 40 dias, de 2001 a 2010, e para cerca de 52 dias, de 2011 a 2020.

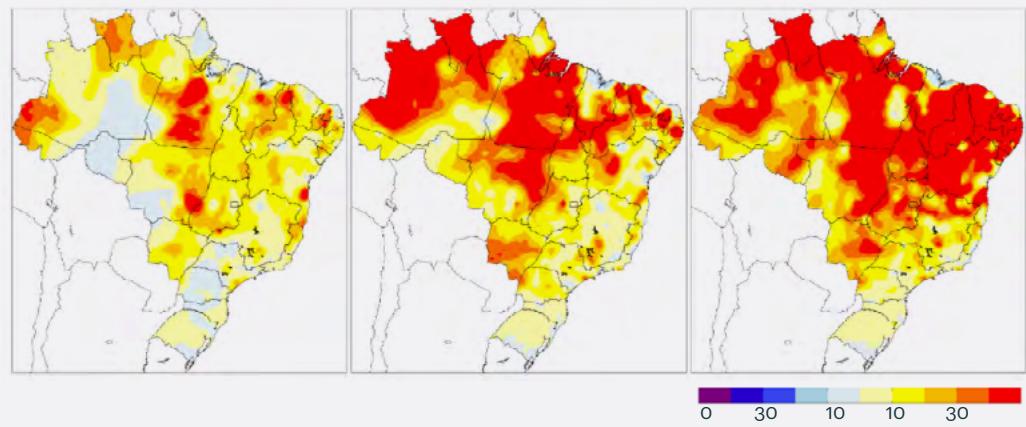


FIGURA 3: Anomalias de ondas de calor (WSDI) observadas para três períodos: 1991-2000, 2001-2010 e 2011-2020, usando o período de 1961-1990 como referência. L.Alves et al., DIIAV/INPE

Ao longo dos anos, observou-se também uma tendência de aumento das áreas que sofreram queimadas no país, com clara relação com o aumento de temperatura e as mudanças climáticas, mas também com as atividades antropogênicas, uma vez que grande parte dos incêndios no país é provocada por pessoas. A perda de vegetação natural pode afetar direta e indiretamente os processos de troca de CO₂ entre a biosfera e atmosfera, contribuindo para o aumento na concentração dos gases de efeito estufa (GEE) (Lee et al., 2021).

As mudanças climáticas também levam a alterações na composição da vegetação e no armazenamento de carbono do ecossistema, que pode se dar, por exemplo, pela morte progressiva de árvores. Contudo, apesar da mudança do clima potencializar efeitos destruidores como incêndios e mudanças no uso do solo, o relatório do IPCC indica ser improvável a perda em larga escala de florestas tropicais devido apenas aos efeitos diretos das mudanças climáticas (Canadell et al., 2021). Concomitante ao aumento da temperatura, ocorre o efeito de fertilização da vegetação pelo CO₂ atmosférico, que poderá estimular maiores taxas fotossintéticas, dependendo de outras condições ambientais, como nutrientes no solo, disponibilidade de água, entre outros. Cabe destacar que, independentemente do fator causador, evidências indicam que o aumento das taxas de mortalidade de árvores em florestas tropicais pode reduzir o tempo de renovação e armazenamento de carbono.

Outro fator crítico é o aumento da evapotranspiração¹ em função do aumento da temperatura e redução da umidade do ar, na maioria das regiões terrestres² (Canadell et al., 2021). Esse processo poderá impactar as trocas gasosas entre vegetação e atmosfera e, em larga escala, afetar o ciclo hidrológico regional. Análises recentes sobre o impacto das mudanças climáticas no ciclo da água, com consequências na taxa de recarga de aquíferos subterrâneos, sugerem mudanças tanto na sazonalidade³ quanto na distribuição espacial da disponibilidade hídrica. Esses impactos serão maiores em cenários de emissões de GEE mais elevadas (Douville et al., 2021). Os impactos também têm sido observados nas taxas de precipitação, que vêm sendo fortemente alteradas (Canadell et al., 2021).

As alterações nos sistemas hidroclimáticos do planeta e as relações com as mudanças climáticas vêm sendo estudadas há décadas. Por exemplo, o El Niño Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno acoplado atmosférico-oceânico que ocorre na região do Pacífico Equatorial com conexões remotas globais. O ENOS é caracterizado por três fases: El Niño (fase quente), La Niña (fase fria) e neutra. Na fase quente de El Niño ocorre enfraquecimento dos ventos alíseos e aquecimento das águas na região central e leste do Pacífico Equatorial, que fica mais quente do que a condição média histórica. A fase La Niña refere-se à situação oposta, ou seja, quando o oceano Pacífico Equatorial está mais frio do que a condição média histórica. A mudança na temperatura do oceano Pacífico Equatorial acarreta efeitos globais nos padrões de circulação atmosférica, transporte de umidade, temperatura e precipitação. Dependendo da intensidade e da região de formação no Pacífico, o fenômeno El Niño altera os regimes de temperatura e precipitação de boa parte do globo. No Brasil, causa secas severas nas regiões Norte e Nordeste e aumento da precipitação

A FLORESTA AMAZÔNICA desempenha um papel ativo na condução do transporte de umidade atmosférica e na geração de precipitação na América do Sul. A estreita associação entre a superfície terrestre e o ciclo da água coloca a região Amazônica sob alto risco de mudança abrupta em sua estrutura e biodiversidade. Na continuidade dos processos de desmatamento e considerando o agravamento das secas na região, prevê-se um cenário de perda de até 50% da cobertura florestal até 2050. A combinação de desmatamento, condições mais secas e aumento dos incêndios pode conduzir a floresta tropical úmida além de um ponto de não retorno, ou seja, para a constituição de uma floresta com estrutura aberta, menor biomassa, menor armazenamento de carbono e menor diversidade. Isso poderá causar rápida degradação das camadas superficiais do solo, redução acentuada na reciclagem da umidade atmosférica, aumento no escoamento superficial da chuva causando erosão, arraste de solo para corpos d'água, entre outros impactos (Douville et al., 2021; Fox-Kemper et al., 2021).

¹ Evapotranspiração é a perda de água do solo por evaporação e a perda de água da planta por transpiração.

² As mudanças climáticas têm potencial de alterar os processos do ciclo hidrológico, tais como precipitação, que afeta o escoamento superficial, temperatura e umidade relativa, que possuem estreita relação com evaporação, e vazão em corpos hídricos, além de evapotranspiração das plantas.

³ As mudanças de sazonalidade estão ligadas a aumentos durante os períodos úmidos de inverno e declínios durante os períodos secos de verão.

na região Sul (Fox-Kemper *et al.*, 2021). Informações recentes indicam que os impactos do El Niño são amplificados pelas mudanças climáticas, em particular pelo aumento de temperatura da atmosfera, fenômeno que pôde ser observado globalmente no ano de 2023.

Os oceanos são reguladores do sistema climático do planeta, devido ao seu grande volume, alta capacidade de retenção e transporte de calor. Eles absorvem mais de 90% do calor e mais de 30% do CO₂ atmosférico derivados das ações antrópicas, portanto amenizando os efeitos potenciais do aquecimento global. Entretanto, isto levou os oceanos a se tornarem mais quentes e ácidos, com consequências profundas para os ecossistemas marinhos e costeiros e a provisão dos serviços para a sociedade, principalmente para as populações costeiras. Os ecossistemas marinhos e costeiros estão entre os mais vulneráveis às mudanças climáticas. Esses ambientes estão sendo afetados diretamente pelo aumento da temperatura (do ar e da água), elevação do nível médio relativo do mar, aumento da frequência de ondas de tempestades e erosão costeira, além das alterações biogeoquímicas como aumento do CO₂, acidificação e desoxigenação das águas. Os impactos dessas alterações são distintos entre oceano aberto, plataforma continental, costa e dentro dos estuários, além de variar entre as diferentes regiões do globo (IPCC, 2019). As alterações no regime de chuvas em grandes bacias hidrográficas (secas e cheias) geram impactos diretos nos estuários e zona costeira adjacente. Os extremos de precipitação e descarga fluvial têm causado inundações e escorregamentos de encostas no litoral, com impactos diretos à vida humana e infraestruturas. Devido à expansão térmica dos oceanos e ao derretimento de geleiras, o aumento do nível do mar acelerou desde a década de 1970. De acordo com o *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (SROCC, 2019), a taxa global de aumento do nível do mar observada no período 2006-2015 foi de 3,6 mm/ano, ou seja, cerca de 2,5 vezes maior do que o valor médio de 1,4 mm/ano verificado em todo o período 1901-1990 (Pörtner *et al.*, 2019; IPCC, 2019).

As mudanças nos padrões climáticos e do ciclo hidrológico observadas em médias latitudes contribuíram para um processo de aumento de salinidade, tanto na superfície quanto no oceano profundo de áreas subtropicais, em especial pelo aumento da evaporação. Outro processo oceanográfico que apresentou mudança foram os padrões das correntes de contorno oeste, que são responsáveis por levar calor dos trópicos para os polos. Essas correntes, que se localizam nas bordas oeste dos oceanos, ao longo dos contornos continentais, sofreram intensificação, aquecimento e expansão em direção aos polos, alterações essas também

influenciadas pelas variações observadas nos padrões dos ventos. Essa tendência também se observa para a costa brasileira, com a intensificação da Corrente do Brasil (Marcello *et al.*, 2018; Gulev *et al.*, 2021), causando aquecimento das águas costeiras e alterações na biodiversidade e recursos pesqueiros (Araújo *et al.* 2022; Franco *et al.*, 2020; Perez & Sant’Ana, 2022).

Devido ao importante papel dos oceanos na regulação climática da Terra, estimar os fluxos de CO₂ tem relevância para avaliar se esses ambientes absorvem ou emitem dióxido de carbono para a atmosfera. A maior absorção de CO₂ atmosférico acarreta a diminuição do pH das águas oceânicas, pelo aumento nas concentrações de ácido carbônico e dissolução de íons carbonato, o que gera o fenômeno da acidificação dos oceanos (Canadell *et al.*, 2021). O progressivo aumento da acidificação foi identificado em massas de água intermediárias (aqueleas encontradas entre 300 m e 1.000 m de profundidade) nos oceanos Pacífico e Atlântico. Outro fenômeno também destacado pelo IPCC é a redução de oxigênio dissolvido no Atlântico Sul, impulsionado pelo aquecimento das águas e pelas mudanças na circulação das correntes oceânicas. A variabilidade climática tem relação com a perda de oxigênio em escalas interanuais e decadais, especialmente nas zonas caracterizadas por concentrações mínimas de oxigênio do oceano tropical.

As interações entre os grandes compartimentos do sistema terrestre (atmosfera, oceanos e ambientes terrestres) são chaves no equilíbrio climático do planeta. As alterações nos padrões climatológicos impactam a sociedade, os sistemas produtivos e os ecossistemas. As variações de regime de chuvas previstas a partir das análises do AR6 indicam que a precipitação provavelmente aumentará em algumas regiões tropicais (incluindo o Sudeste do Brasil). Para a região sudoeste da América do Sul poderá haver redução da média anual de precipitação, mesmo considerando cenários futuros com aumento nas temperaturas médias globais abaixo de 1,5°C. Evidentemente, em níveis mais altos de aquecimento global, a probabilidade das alterações é ainda maior.

Como consequência do aumento de eventos extremos de precipitação, os modelos hidrológicos globais projetam uma fração maior de áreas terrestres a serem afetadas por um aumento nas cheias dos rios, como previsto para a região oeste da Amazônia (Fox-Kemper *et al.*, 2021), contrastando com maiores períodos de seca (SPA, 2022). As alterações nos padrões de chuva, induzidas pelas mudanças do clima, podem também modificar os fluxos naturais de água e nutrientes aos rios, contribuindo muitas vezes para o aumento do processo de eutrofização. Essa situação se agrava em ambientes aquáticos que já são eutrofizados pelos efluentes urbanos não tratados.

Alterações significativas na duração e intensidade das secas também são esperadas na bacia amazônica e no sudoeste da América do Sul. Em cenários intermediários ou de altas emissões, a probabilidade de secas extremas aumenta em 200-300% nessas regiões. Mesmo sob um cenário de baixas emissões, a probabilidade de secas extremas aumenta em 100% no sudoeste da América do Sul, principalmente em áreas do Chile e da Argentina, mas também na região oeste da Amazônia. Assim, com alta confiabilidade estatística, a severidade e a intensidade da seca aumentarão nessas localidades. Além das secas meteorológicas, o aumento do consumo de água nos últimos 50 anos, em particular pela irrigação, em algumas localidades do Brasil pode ter contribuído mais para a seca do que apenas fatores climáticos (Fox-Kemper *et al.*, 2021).

Variações nos extremos de temperatura do ar induzidas pelas mudanças do clima também são indicadas nas análises do AR6 do IPCC. Por exemplo, as observações evidenciam um aumento no número de dias e noites quentes e uma diminuição no número de dias e noites frios na escala global desde 1950. De forma geral, tanto os extremos de frios quanto os extremos de calor apresentam tendência crescente, se constituindo em um forte indicativo do processo de aquecimento global (Figura 3). Na América do Sul, a tendência é de aumento na frequência de ondas de calor, com impactos negativos sobre a saúde humana (Fox-Kemper *et al.*, 2021).

3

NOSSO PRESENTE

Neste item, constam as informações relacionadas aos impactos da mudança do clima observados e projetados no Brasil. Alguns exemplos pontuais relacionados a biomas, regiões e cidades brasileiras são destacados. A fim de facilitar a compreensão das informações mapeadas, o conteúdo foi organizado por temas identificados.

Síntese dos impactos observados e projetados para os principais setores na América do Sul e América Central

Média das projeções entre cenários e século XXI

CA América Central

NWS Noroeste da América do Sul

NSA Norte da América do Sul

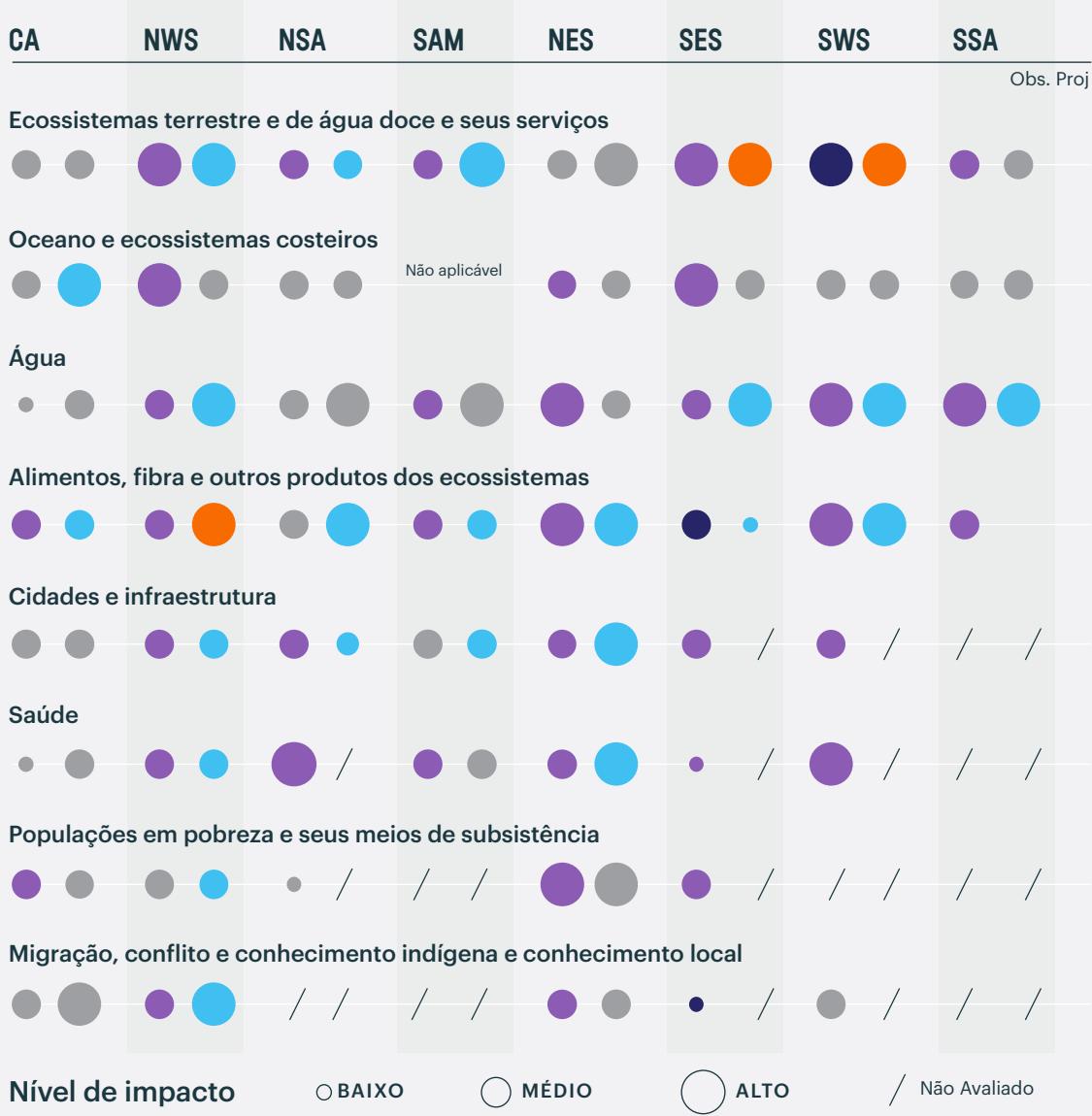
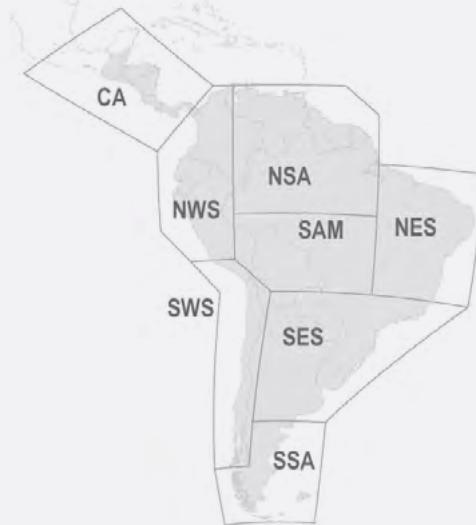
SSM Região do Monção da América do Sul

NES Nordeste da América do Sul

SES Sudoeste da América do Sul

SWS Sudeste da América do Sul

SSA Sul da América do Sul



Nível de confiança:

IMPACTOS OBSERVADOS ● BAIXO

IMPACTOS PROJETADOS ● BAIXO

● MÉDIO

● MÉDIO

● ALTO

● ALTO

/ Não Avaliado

A FIGURA 4 (ACIMA), extraída do Capítulo 12 do Grupo de Trabalho Dois do IPCC (Ch 12, WG2 AR6), traz a compilação dos impactos observados e projetados às sub-regiões que abrangem o território brasileiro, e na sequência o texto detalha as informações por setores.

EXPOSIÇÃO SOCIOECONÔMICA E IMPACTOS

Muitos eventos climáticos extremos já afetam o Brasil e devem se intensificar. Esses impactos associados às mudanças climáticas são fatores que conduzem, por exemplo, à insegurança alimentar e desencadeiam riscos que afetam a saúde humana e a economia. Esses e outros impactos sociais relacionados às mudanças climáticas, como mortes devido a enchentes e secas, e doenças transmitidas por vetores como dengue e malária, são muito maiores em comunidades em alta vulnerabilidade. O AR6 do IPCC indica, por exemplo, que a mortalidade de pessoas causada por enchentes, secas e tempestades entre 2010 e 2020 foi 15 vezes maior nas regiões/países de maior vulnerabilidade, quando comparada às regiões/países mais estruturados e resilientes (IPCC-SYR-SPM, 2023). Efeitos múltiplos e em cascata aceleram os riscos à economia, à segurança alimentar e hídrica, à biodiversidade, à saúde e ao bem-estar das pessoas. Em junho de 2010, por exemplo, uma sucessão de eventos chuvosos extremos provocou inundações severas em várias bacias de rios costeiros dos estados de Pernambuco e Alagoas. Os relatórios de análise do Banco Mundial e do governo do estado de Pernambuco indicaram situações de calamidade pública em 67 cidades, com 20 mortes, cerca de 30 mil desabrigados e perdas econômicas da ordem de US\$ 1 bilhão (World Bank, 2012). Eventos climáticos extremos geraram perdas da ordem US\$ 3,8 trilhões nos 30 anos, entre 1991 e 2021, ao setor agropecuário em todo o mundo (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, FAO, 2023). No Brasil, várias estimativas apontam para perdas importantes no setor. Por exemplo, a seca na região Sul no período de 2019 a 2020 contabilizou perdas na agricultura na ordem de R\$ 13,4 bilhões, em estudo divulgado pela Confederação Nacional dos Municípios (CNM, <https://www.cnm.org.br/comunicacao/>). Já a consultoria de riscos AGRC (Aon Global Risk Consulting) estimou perdas no setor agrícola da ordem de US\$ 15,3 bilhões na safra 2022-2023 para as regiões Sul e Centro-Oeste do Brasil.

Pequenos agricultores, trabalhadores rurais, comunidades tradicionais, com destaque para os povos indígenas, mulheres, crianças, idosos e pessoas marginalizadas socioeconomicamente, são considerados populações em condições de vulnerabilidade, isto é, aquelas que mais sofrem com os impactos e riscos das mudanças climáticas. Reduzir a vulnerabilidade é pré-requisito para atingir justiça climática e uma transição justa (Birkmann *et al.*, 2022). Essa vulnerabilidade foi recentemente evidenciada quando, entre 2014 e 2016, apesar do aumento observado de chuvas, a região de SES enfrentou uma crise hídrica que afetou a população e a economia das principais capitais do Sudeste brasileiro (Castellanos *et al.*, 2022).

Em 2023, secas extremas impactaram rios da bacia amazônica, nos territórios do Brasil, Colômbia, Peru e Venezuela. Comunidades ribeirinhas e indígenas do rio Negro, do Baixo Amazonas e do Tapajós ficaram ilhadas, sem acesso a comida, água potável, serviços de saúde, entre outros. Botos, tartarugas e peixes morreram, em consequência do aumento na temperatura da água e redução da concentração de oxigênio nas águas. Destaca-se que muitas comunidades da bacia amazônica têm nos peixes sua fonte central de proteína.

OCEANO E ZONA COSTEIRA

Os ecossistemas marinhos e costeiros, assim como seus serviços e atividades que neles se desenvolvem, estão expostos e são altamente vulneráveis a quase todos os efeitos das mudanças climáticas, recebendo os impactos provenientes do oceano e do continente. A zona costeira está sob fortes pressões antrópicas como urbanização, poluição, eutrofização, sedimentação, pesca e extração de recursos (Cooley *et al.*, 2022). De acordo com a Organização Meteorológica Mundial, o Atlântico Sudoeste é uma das regiões mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas (WMO, 2022). A análise regional do AR6 aponta que entre os principais riscos enfrentados na América do Sul estão os danos à vida e a infraestruturas, provocados por cheias, deslizamentos de terra, elevação do nível do mar, ondas de tempestades, além de erosão costeira. De fato, a elevação do nível do mar tem sido mais acelerada que a média global em boa parte do litoral brasileiro, intensificando os processos de erosão e inundação da costa. Em média, 35% da costa brasileira sofre com erosão, embora o fenômeno seja concentrado nas praias do Norte e Nordeste (60-65% do litoral) e no estado do Rio Grande do Sul (MMA, 2018). Nos locais mais afetados se observam redução da largura das praias, remoção de franjas dos manguezais, destruição de calçadas e infraestruturas, com impactos adversos na economia dos municípios e na vida dos moradores.

Apesar das lacunas de conhecimento nas avaliações regionais, dados observacionais e modelados confirmam o aumento da temperatura superficial do mar (TSM) no Atlântico Sudoeste, particularmente entre a região de Cabo Frio (RS) e a Argentina (Franco *et al.*, 2020), como resultado da intensificação e deslocamento da Corrente do Brasil, que carrega águas mais quentes (Marcello *et al.*, 2018). Os resultados modelados mostraram que, entre o início do século XX até o início do XXI, a bifurcação da corrente sul-equatorial, que dá origem à Corrente do Brasil, se deslocou para sul, concomitantemente com um aumento no volume de água transportado. Os impactos do aquecimento das águas do Atlântico já têm sido observados na biota como, por exemplo, mudanças na abundância e na distribuição geográfica de

peixes de águas rasas do SE (Araújo *et al.*, 2018); tropicalização da fauna demersal (Perez & Sant’Ana, 2022) e deslocamentos de estoques pesqueiros importantes da plataforma continental (por exemplo, sardinha verdadeira; Franco *et al.*, 2020).

Outros efeitos do aquecimento global nos oceanos, enfatizado nos últimos relatórios do IPCC e do WOA, é o aumento das ondas de calor marinhas (OCM), quando a TSM alcança temperaturas altas anômalas por períodos prolongados (semanas ou meses). Tais eventos causam impactos devastadores sobre a biodiversidade marinha, com mortandade em massa em curto tempo (Cheug *et al.*, 2021). Para o Atlântico Sul e Sudoeste já se observa um aumento significativo na frequência, intensidade, duração e extensão espacial das OCMs, entre 1982-2016 (Rodrigues *et al.*, 2019). Sob um cenário moderado de aquecimento futuro, a tendência de aumento das OCMs deverá continuar até 2050 (Costa e Rodrigues, 2021). Sob um cenário de aquecimento global mais extremo, o Atlântico Sul e Sudoeste poderão atingir um estado quase permanente de OCM até o fim do século XXI.

Em nível global, os recursos marinhos já apresentam sinais de declínio em função do aumento da TSM e das OCMs (Cit). Se o aquecimento global não for controlado, é previsto um declínio de 77% da biomassa de estoques pesqueiros na Zona Econômica Exclusiva (ZEE), incluindo a ZEE brasileira. As estimativas até 2050 são de queda de até 30% na receita (em relação ao PIB) e diminuição de 30% a 50% dos empregos relacionados à pesca. No Brasil, as atividades de pesca e aquicultura geram renda para milhares de pessoas e contribuem para a segurança alimentar, com um consumo médio *per capita* de proteína animal marinha de mais de 20 kg por ano, com maiores taxas nas regiões Norte e Nordeste (FAO, 2015). A média anual de captura de pescado marinho no Brasil é em torno de 500 mil toneladas e, de acordo com DMC-PBSE, a pesca artesanal (incluindo mariscagem) é responsável por mais de 50% do pescado nacional, empregando 25 vezes mais pessoas que a pesca industrial (Seixas *et al.*, 2023). Uma parcela da produção pesqueira nacional visa exportação, como a lagosta no Nordeste, da qual dependem quase 100 mil pessoas. Na última avaliação oficial da estatística pesqueira no Brasil (2015; REVISEE), mais de 80% dos pescados já eram sobre-exploitados, ou seja, capturados em uma velocidade superior à que se reproduzem. Com o aquecimento, a acidificação e a desoxigenação das águas, diversas espécies de importância econômica que vivem nas águas da ZEE brasileira estão ameaçadas.

Dentre os ecossistemas marinho-costeiros mais ameaçados do planeta pelo aquecimento das águas e acidificação dos oceanos estão os recifes de corais. Os relatórios do IPCC alertam que, sob um aumento médio da temperatura em 1,5°C, entre 70% e 90% dos recifes de corais do mundo desaparecerão. Caso o aumento seja de 2°C, mais de 90% deixarão de existir. De acordo com o mais recente Diagnóstico Marinho Costeiro da Plataforma Brasileira de Biodiversidade (Seixas et al., 2023), entre 16% e 37% dos recifes coralinos brasileiros estão sob risco alto a muito alto de impactos cumulativos do aquecimento das águas e estressores locais, como pesca e urbanização. Eventos de branqueamento de corais aumentaram em frequência, intensidade e abrangência, tanto nos recifes tropicais como subtropicais brasileiros (Duarte et al., 2020; Banha et al., 2020; Gaspar et al., 2021), impactando mais de 25 espécies de corais, incluindo as mais resistentes.

Outros ecossistemas altamente vulneráveis às mudanças climáticas são os ecossistemas costeiros vegetados (manguezais, pradarias de gramas marinhas e marismas). Globalmente, cerca de 50% desses ecossistemas foram perdidos nos últimos 100 anos, como resultado de desmatamento, degradação da qualidade das águas, aumento da temperatura, elevação do nível do mar e eventos climáticos extremos. No Brasil, resultados do projeto MapBiomass (<https://brasil.mapbiomas.org>) mostram uma perda de 2% de áreas de manguezais entre 2000 e 2020, principalmente nos estados do Amapá, Maranhão, Bahia, Sergipe e Paraná (Diniz et al., 2019; MapBiomass 2021). As estimativas indicam uma taxa média de perda de 0,13% ao ano para a região (Goldberg et al., 2020; Thomas et al., 2017), atribuídas principalmente à elevação do nível do mar, erosão costeira, eventos climáticos extremos, aquacultura, salinicultura e construção de rodovias (Ferreira e Lacerda, 2016; Gomes et al., 2021). Nas regiões deltaicas do estado do Pará, o manguezal se expandiu sobre as áreas transicionais internas e terrenos mais elevados em resposta à elevação do nível do mar (Cohen et al., 2018; MapBiomass, 2021). Na região Nordeste, os manguezais estão avançando dentro de alguns estuários como resultado de redução de chuvas e intrusão salina (Jennerjahn et al., 2017, Pelage et al., 2019), sofrendo também pressões antrópicas múltiplas (Bertrand et al., 2018; Jennerjahn et al., 2017; Friess et al., 2019; Bryan-Brown et al., 2020). Em situações particulares, os manguezais brasileiros avançam por sobre as áreas de marismas e campos como resposta ao aquecimento global (Cohen et al., 2020; França et al., 2018). A redução dos manguezais coloca sob risco inúmeros serviços providos por esses ecossistemas à sociedade, como proteção da costa, purificação da água, sequestro de carbono e manutenção da biodiversidade e da pesca.

De acordo com o DMC-PBBES, 70% dos recursos pesqueiros marinhos brasileiros usam os manguezais como berçário (Seixas *et al.*, 2023). Já está comprovado que manguezais brasileiros são grandes sumidouros de carbono (carbono azul), sequestrando entre 0,4 e 2,6 Teragramas Cano-1, cujos estoques (330 Mg C. ha-1) estão concentrados nas camadas do solo e sedimentos (Rovai *et al.* 2022; Hatje *et al.*, 2023). No nível global, manguezais brasileiros detêm 8,5% dos estoques totais de carbono orgânico desses ecossistemas. Adicionalmente, manguezais são barreiras naturais, protegendo a costa contra os impactos de ondas de tempestades e elevação do nível do mar. Assim, tanto a preservação como a restauração dos manguezais, marismas e pradarias de gramas marinhas são reconhecidas como eficientes soluções baseadas na natureza (SbN), para aspectos de adaptação e mitigação das mudanças climáticas, com benefícios múltiplos.

A zona marinha e costeira do Brasil possui regiões de alta relevância para as outras atividades da economia marinha, incluindo as indústrias extrativistas (óleo, gás e mineração), o transporte de mercadorias, o turismo e, mais recentemente, as instalações de energia renovável. Essas atividades estão ameaçadas principalmente por impactos da elevação do nível do mar e pelo aumento na intensidade e frequência de eventos extremos. Tais alterações já têm gerado efeitos socioeconômicos relevantes em diversas partes do país. O complexo de portos de Santa Catarina, por exemplo, teve suas atividades interrompidas 76 vezes nos últimos seis anos, devido a fortes ventos ou ondas, com perdas financeiras estimadas entre US\$ 20 mil e US\$ 50 mil para cada 24 horas ociosas. No porto de Santos em São Paulo – o maior da América Latina –, em um período de 88 anos (1928-2016), a frequência de tempestades foi três vezes maior nos últimos 17 anos (2000-2016), causando sérias perdas socioeconômicas (Castellanos *et al.*, 2022).

No Nordeste do Brasil, as pessoas, a infraestrutura e as atividades econômicas estão igualmente expostas ao aumento do nível do mar ao longo de 3.800 quilômetros de linha costeira. A alta concentração de cidades na costa é uma preocupação para todas as capitais estaduais, sendo que a estimativa de pessoas vulneráveis, em 2019, totalizava cerca de 12 milhões (Castellanos *et al.*, 2022). Já houve relatos de efeitos do aumento do nível do mar em cidades costeiras como Salvador, com destruição de construções urbanas. O aumento do nível do mar, o aumento da temperatura e a acidificação do oceano impactaram negativamente a produção de camarão da região.

SEGURANÇA ENERGÉTICA

De acordo com o IPCC AR6, a interconectividade e complexidade dos sistemas climáticos e energéticos levam a desafios pouco triviais na busca de soluções transformadoras para que o setor contribua para limitar o aquecimento global a 1,5°C (IPCC, 2022 – Ch 6 Energy Systems). Destaca-se que os impactos das mudanças climáticas no sistema de energia podem ser divididos em três áreas: no fornecimento de energia; no consumo de energia; e na infraestrutura de energia, como exemplificado na Figura 5 para o setor elétrico. As vulnerabilidades no setor variam de acordo com os sistemas de energia e com as características da matriz elétrica, podendo ser reduzidas a depender das mudanças no mix de tecnologias de geração (Yalew, S. et al., 2020; IAB, 2021; Brito et al., 2022).

Impacto da mudança climática no setor elétrico

Essa tabela ilustra os impactos das ameaças climáticas sobre os principais aspectos do sistema elétrico: geração, transmissão e distribuição.



FIGURA 5: possíveis impactos da mudança do clima no setor elétrico.

Fonte: elaboração própria, adaptado de Brito et al., 2022.

As altas velocidades do vento podem romper as linhas de transmissão, seja por falha mecânica ou por fazer com que as linhas colidam, causando eventos transitórios na distribuição de energia (Panteli e Mancarella 2015; Yalew et al., 2020; IPCC, 2022). Furacões e tempestades podem danificar as infraestruturas do sistema de eletricidade, incluindo usinas eólicas e solares fotovoltaicas. Os incêndios florestais representam uma ameaça significativa aos sistemas de distribuição de eletricidade, em condições de secas e em regiões áridas (Dian et al., 2019; IPCC, 2022). Os raios podem causar incêndios florestais, falhas em sistemas elétricos pelo impacto direto nas torres de transmissão ou queda de árvores em subestações de energia. As inundações representam uma ameaça aos sistemas de transmissão e distribuição, especialmente cabos subterrâneos e subestações em cotas próximas a rios. As inundações costeiras também representam uma ameaça à infraestrutura do sistema elétrico. O aumento do nível do mar decorrente da mudança climática e das tempestades associadas também pode representar um risco significativo para os sistemas elétricos costeiros (Entriiken e Lordan, 2012; IPCC, 2022).

Os aumentos de temperatura influenciam os perfis de carga e a geração de eletricidade, além de afetar potencialmente a infraestrutura de suporte de informações e comunicação. O calor pode causar impactos diretos nos equipamentos do sistema elétrico, como transformadores. Já em sistemas fotovoltaicos por calor extremo pode causar falhas no inversor ou falta de comunicação entre equipamentos. As falhas ocorrem sob altas temperaturas e baixas velocidades de vento, e podem ser exacerbadas pelo efeito de ilha de calor urbana (McColl et al., 2012). O aumento das temperaturas afeta a adequação do sistema ao reduzir a capacidade de transmissão elétrica, aumentando simultaneamente o pico de carga devido ao aumento das necessidades de ar-condicionado (Bartos et al., 2016; IPCC, 2022 Ch. 6).

No Brasil, as fontes renováveis de energia são extremamente importantes à matriz energética, incluindo energia eólica, solar, hidrelétrica, além de bioenergia vinda de biomassa, como cana-de-açúcar, por exemplo. Uma matriz diversificada é importante para a segurança energética (da Conceição & Moura, 2021). Em 2018, as fontes de energia renováveis representaram 83% no abastecimento doméstico de eletricidade no Brasil. Por conta da importância dos recursos naturais e do clima para as fontes renováveis, o setor de energia é muito vulnerável aos impactos determinados pelas mudanças climáticas e eventos extremos do clima, seja na produção e abastecimento, seja na transmissão e demanda (Brasil, 2020).

A energia hidrelétrica corresponde a mais de 53% da produção de energia no Brasil e está diretamente relacionada à disponibilidade hídrica. As mudanças no escoamento e em sua sazonalidade, associadas às alterações na temperatura e intensidade da precipitação, influenciarão a produção de hidroeletricidade (IPCC,

2022 – Ch 6. Energy Systems). Por exemplo, reduções na precipitação observadas no Cerrado impactaram o fornecimento de água dos reservatórios principais de cidades importantes da região central do Brasil, levando a uma crise hídrica em 2016/2017 e afetando a geração de energia hidrelétrica (www.adasa.df.gov.br/images/banners/alta.pdf). No Nordeste, a seca severa de 2012-2013 impactou fortemente a produção energética. No Sudeste, secas extremamente longas impactaram a geração de energia elétrica, causando um aumento de entre 20% e 25% no preço da energia (Castellanos *et al.*, 2022).

Tempestades extratropicais também têm impactado o fornecimento de energia elétrica no Brasil, incluindo as que envolvem granizo, que são recorrentes na região Sul. Efeitos sobre a velocidade do vento, por hora, diária ou sazonal, também podem impactar o funcionamento de parques eólicos já instalados. O aumento da temperatura do ar, umidade e concentração de nuvens afetam a eficiência de painéis solares para produção de energia. Além disso, o desempenho de baterias e a segurança em veículos elétricos podem ser comprometidas frente a eventos extremos de onda de calor, com risco de explosão devido às elevadas temperaturas.

Finalmente, a demanda por energia tende a aumentar frente às mudanças climáticas no Brasil, respondendo ao aumento das necessidades de conforto térmico (resfriamento pelo uso de ar-condicionado) em setores residenciais, comerciais, de serviços, prédios públicos, transportes e indústrias. A demanda energética também pode aumentar para irrigação em sistemas agropecuários, além de influenciar o setor de transportes ao afetar a performance dos motores a combustão (Brasil, 2020), o desempenho de baterias e a segurança em veículos elétricos frente a eventos extremos. A análise de risco climático é uma ferramenta importante para apoiar a identificação dos possíveis impactos e promover medidas de adaptação, de modo a aumentar a resiliência do setor e garantir a segurança do fornecimento (de Abreu *et al.*, 2022, Staffell e Pfenninger 2018; IPCC, 2022 Chapter 6).

SAÚDE

As mudanças climáticas têm impactos diretos e indiretos sobre a saúde humana, refletindo as inter-relações entre pressão, estresse e tensões decorrentes do crescimento populacional, das atividades econômicas, da urbanização, do crescimento do consumo e, principalmente, das desigualdades e injustiças sociais. Os impactos das mudanças climáticas relacionados à saúde humana já são observados no Brasil em alguns setores, principalmente em populações vulnerabilizadas e historicamente marginalizadas (Castellanos *et al.*, 2022). O Ministério da Saúde do

Brasil estimou a ocorrência de 44.228 mortes por doenças crônicas não transmissíveis atribuídas à poluição do ar no país, em 2016 (Brasil, 2019).

Importante salientar que o impacto das mudanças climáticas na saúde da população tende a aprofundar essas históricas desigualdades sociais e, portanto, os resultados do AR6 devem considerar o contexto da formação socioespacial brasileira, a qual foi marcada pela expropriação de terras indígenas e por um longo regime escravocrata. Assim, deve-se considerar uma perspectiva interseccional de classe social, gênero e raça, a fim de não invisibilizar mulheres, povos indígenas e a população negra, sobretudo de áreas periféricas, que são os grupos mais afetados pelas mudanças climáticas.

Estima-se que cerca de 24 milhões de pessoas estejam expostas a incêndios florestais na Amazônia (Urrutia-Pereira et al., 2021), com ênfase no arco do desmatamento, uma região composta por vários municípios brasileiros no sul e oeste da Floresta Amazônica, com diversos impactos sobre a saúde humana, que incluem, por exemplo, o aumento exacerbado de crises de covid-19 na Amazônia brasileira (média confiança, média evidência, alta concordância); (de Oliveira et al., 2020); (Tabela 12.5). Alguns dos principais impactos das elevadas temperaturas associadas à fumaça dos incêndios florestais são a exacerbção das internações hospitalares por doenças respiratórias, como asma em crianças e DPOC (doença pulmonar obstrutiva crônica) em idosos, o aumento de mortes por doenças cardiovasculares em pessoas com comorbidade, danos genéticos, além do baixo peso ao nascer (de Oliveira Alves et al., 2015; Nawaz et al., 2000,) são efeitos documentados na literatura nacional e internacional, decorrentes da exposição ao material particulado fino (PM 2.5). Esses impactos sobre a saúde representam um aumento substancial nos custos públicos do Sistema Único de Saúde (alta confiança) (Ignotti et al., 2010; Silva et al., 2013; de Oliveira Alves et al., 2017; Machin et al., 2019; Castellanos et al., 2022). A saúde das populações da Amazônia é afetada por fumaça decorrente dos incêndios florestais e aqueles resultantes da estiagem histórica que ocorreu no final de 2023, que atingiu grandes proporções com consequências diretas para as comunidades mais vulnerabilizadas da região. Em janeiro de 2024, moradores de comunidades de Manaus relataram falta de ar, tontura e sensação de queimação nos olhos. Nesse período, o número de focos de calor no Amazonas aumentou em 245% em relação a janeiro de 2023 (TNC, Brasil 2024).

Áreas de florestas degradadas pelo desmatamento ocasionam alterações da biodiversidade, da dinâmica e da estrutura desses sistemas, levando a mudanças nos habitats de vetores e das

espécies hospedeiras, contribuindo para o surgimento de uma emergência de doenças zoonóticas, a partir do aumento da interação entre vida silvestre e humanos. Em 2009 e 2012, inundações relacionadas a flutuações extremas nos níveis do rio Amazonas levaram a surtos de doenças como diarreia, leptospirose e dermatites (Hacon *et al.*, 2019; Castellanos *et al.*, 2022).

O aumento da temperatura média global, ondas de calor, secas prolongadas, precipitação e redução da umidade relativa do ar podem conduzir a diferentes cenários de exposição com impactos diretos e indiretos sobre a saúde pública. Desde o 5º Relatório de Avaliação (AR5), aumentaram as evidências acerca da capacidade vetorial para dengue, malária e outras doenças transmitidas por mosquitos com o aumento das temperaturas médias. A combinação do aumento de temperatura, umidade relativa e precipitação está ampliando as áreas favoráveis à circulação de doenças transmitidas por vetores, incluindo doenças endêmicas e emergentes, como dengue, chikungunya e zika. (Cissé *et al.*, 2022).

Temperatura e precipitação podem influenciar a transmissão da dengue, impactando a população do vetor. A abundância de *Aedes aegypti* é parcialmente regulada pela precipitação, que forma criadouros e estimula o desenvolvimento de ovos. Alternativamente, a temperatura influencia a capacidade do mosquito de sobreviver e determina seu desenvolvimento e taxas reprodutivas (Johansson *et al.*, 2009; Mendonça *et al.*, 2011). O mosquito *Aedes aegypti*, adaptado ao contexto ambiental e desigual do processo de urbanização no Brasil, tem como característica uma faixa ótima de temperatura, entre 19º e 30°C (Mendonça *et al.*, 2011), proliferação em focos de água parada e locais com umidade suficiente para eclosão de ovos. As condições de vulnerabilidade socioambiental também favorecem a propagação da arbovirose. O novo cenário climático apresenta expansão significativa da dengue em termos de morbidade e mortalidade em diferentes regiões do país, indicando sua adaptação à tendência de elevação térmica, principalmente da temperatura mínima, e higrométrica, associada à vulnerabilidade, refletindo na intensificação do risco da dengue, uma vez que há uma expansão espacial e temporal de condições ambientais ideais para o desenvolvimento do vetor. Diversas doenças transmitidas por vetores como a malária e a leishmaniose são endêmicas da região amazônica; contudo, mudanças socioambientais estão alterando a dinâmica natural dessas doenças. Uma importante relação entre surtos de doenças infecciosas e eventos climáticos (secas, enchentes, ondas de calor, ENSO) ou eventos antrópicos (desmatamento, construção de barragens e fragmentação de habitat) ocorre na Amazônia brasileira. Evidentemente,

esses impactos são mais severos sobre populações de baixa renda com acesso limitado a serviços de saúde (Castellanos *et al.*, 2022).

O aumento das inundações em áreas urbanas pode agravar os problemas de saúde, favorecendo surtos de malária, arboviroses, febre tifoide, doenças gastrointestinais e cólera. Em cidades superpovoadas como o Rio de Janeiro e São Paulo, parcelas numerosas da sociedade vivem em locais com acesso precário a serviços de saneamento básico, saúde pública e refrigeração residencial, como favelas, e são vulneráveis aos efeitos das ilhas de calor sobre o conforto térmico e a saúde humana. Estes incluem doenças cardiopulmonares, doenças transmitidas por vetores, gastroenterites, dermatites. Em São Paulo, um estudo indicou que mais de 90% dos casos de dengue estão associados ao aumento da temperatura, sendo o patamar acima de 32°C um fator mais relevante do que as condições socioeconômicas precárias ou a alta densidade populacional em áreas de favelas (Araujo *et al.*, 2015). O estresse térmico é reconhecido por piorar as condições cardiovasculares e respiratórias e a diabetes, podendo chegar a casos de óbito. Além dos efeitos das ilhas de calor, a população também é vulnerável aos impactos dos eventos extremos, como o aumento de tempestades, causando perdas econômicas e outros problemas sociais (Castellanos *et al.*, 2022).

Os impactos na saúde humana podem ser potencializados ou minimizados em função dos determinantes sociais, econômicos e ambientais, individuais e coletivos, inerentes a uma determinada organização social e a suas inter-relações. Os riscos à saúde advindos das mudanças climáticas devem ser analisados em conjunto com seus determinantes, permitindo a identificação e priorização de políticas públicas intersetoriais que proporcionem o aumento da capacidade de previsão, resposta e adaptação de grupos populacionais aos problemas de saúde, em especial os grupos vulnerabilizados.

O estresse térmico é reconhecido por piorar as condições cardiovasculares e respiratórias e exacerbar as doenças metabólicas, com destaque para a diabetes (Lapola *et al.*, 2019a). Além dos efeitos das ilhas de calor, essas pessoas também são vulneráveis aos impactos dos eventos extremos, como ondas de calor, a fermentos e casualidades devidos ao aumento de tempestades, causando perdas econômicas e outros problemas sociais (Vemado and Pereira Filho, 2016).

VULNERABILIDADE DAS COMUNIDADES

POVOS ORIGINÁRIOS E QUILOMBOLAS DA AMAZÔNIA

O conhecimento e a própria sobrevivência dos povos indígenas e comunidades tradicionais é de importância central para a proteção ambiental e no combate à mudança do clima. Em 2014, os territórios indígenas e outras áreas protegidas da Amazônia representaram o equivalente a 58,5% de todo estoque de carbono no bioma e tiveram a menor taxa de desmatamento (2,1%) e incêndios, evidenciando sua eficácia na proteção dos ambientes naturais e seus serviços ecossistêmicos (Birkmann *et al.*, 2022). Na região de SAM (Figura 4), áreas protegidas do Cerrado, incluindo territórios indígenas, também contribuíram para reduzir significativamente o desmatamento na região do arco do desmatamento amazônico (Castellanos *et al.*, 2022). Entretanto, a manutenção das comunidades dos povos originários e a integridade de seus territórios é ameaçada pelo aumento do desmatamento, conflitos e invasões de terras, expansão da pecuária, mineração, incêndios florestais, problemas de saúde e violação dos direitos humanos. Comunidades indígenas e outras comunidades rurais dependentes de recursos naturais da Amazônia vêm também sofrendo os impactos climáticos de secas extremas e enchentes na última década, principalmente sobre sua segurança alimentar (Castellanos *et al.*, 2022).

POPULAÇÃO DO SEMIÁRIDO DO NORDESTE

A região climática NES é ocupada, em grande parte, pelo Nordeste brasileiro (Figura 4). Essa é a zona semiárida mais densamente populosa do mundo. Sua população, especialmente rural, é altamente exposta a intensos regimes de seca, com impactos bem documentados sobre a segurança hídrica e alimentar, a saúde e o bem-estar humanos. Os baixos níveis de desenvolvimento econômico e de indicadores sociais e de saúde da região aumentam a vulnerabilidade, especialmente para agricultores pobres e comunidades tradicionais (Castellanos *et al.*, 2022).

O Nordeste abriga cerca de 60 milhões de pessoas, das quais mais de 70% moram em áreas urbanas (dados para 2010). Nas capitais dos estados, 45% da população vive na pobreza (dado para 2003), geralmente em favelas, que já sofrem com deficiência hídrica, sistemas de esgotamento sanitário ineficientes ou insuficientes e baixo acesso à saúde e educação. As pessoas estão expostas à seca intensa e fome, e quase 94% da região tem uma susceptibilidade à desertificação média a alta (Castellanos *et al.*, 2022).

As populações nordestinas que vivem no meio rural ou em pequenas aglomerações urbanas, principalmente as do bioma Caatinga, são vulneráveis aos efeitos das secas recorrentes. Historicamente, a reação, em momentos críticos, era a emigração para os grandes centros urbanos regionais ou para outras regiões brasileiras. Conflitos, como saques e invasões, eram frequentes. Nas duas últimas décadas, entretanto, tais reações têm sido bem menos marcantes, devido a políticas públicas que buscam assegurar maior resiliência social e econômica às tensões, também impostas pelo clima. Dentre estas políticas, cabe destacar:

- o programa de transferência de renda para populações em situação de pobreza (Bolsa Família), que atende a mais de seis milhões de famílias na região;
- o programa Luz para Todos, que praticamente universalizou o acesso à energia elétrica, em certos casos com tarifas subsidiadas;
- o Sistema Único de Saúde, cuja implantação cobre boa parte do território;
- os mecanismos de crédito à produção rural (Pronaf), com mecanismos de seguro para a frustração de safras; e
- o programa de construção de um milhão de cisternas para a captação e armazenamento de água da chuva.

O Nordeste brasileiro apresentou redução do volume de chuvas entre 1971 e 2010, dificultando o acesso à água em algumas regiões. A vazão dos rios diminuiu em algumas áreas e aumentou consideravelmente em outras, causando diversos eventos de secas, assim como de inundações. O período de seca severa de 2012-2013 afetou em torno de nove milhões de pessoas que estavam expostas à escassez de água, comida e energia (Castellanos *et al.*, 2022).

POPULAÇÃO URBANA

A população brasileira residindo em áreas urbanas deverá aumentar substancialmente, de 87% (2020) para 92,4% em 2050 (United Nations, 2019). Considerando a ausência de uma reversão substancial nas (insuficientes) políticas atuais de redução de pobreza e de desigualdades no Brasil, grande parte desse estoque futuro de população urbana estará concentrada em assentamentos precários (Alvalá; Barbieri, 2017). O Censo Demográfico de 2010 revela, por exemplo, que 41,4% da população urbana brasileira vivia em assentamentos precários, particularmente na região Norte (IBGE, 2020); e entre esses, oito milhões de brasileiros residiam em áreas propensas a desastres naturais (IBGE, 2019).

Embora o ritmo atual de crescimento populacional nas grandes cidades seja reduzido, ele é mais significativo nas pequenas e médias cidades. Praticamente metade da população brasileira no ano de 2010 vivia em municípios de até 100 mil habitantes, que apresentam desafios específicos em termos de adaptação às mudanças climáticas. Se, por um lado, a concentração de pessoas em grandes cidades tende a ser percebida como o principal problema para a gestão e para o planejamento, por outro, a dispersão populacional em municípios de menor porte gera um desafio para o planejamento e investimentos sociais. A diversidade climática, em particular, e ambiental, de modo amplo, produz uma camada adicional de complexidade para a gestão de políticas adaptativas nas cidades brasileiras (Livreto Cidades e Urbanização, Rede Clima).

Os impactos das mudanças climáticas já são sentidos na população urbana, ao se avaliarem a frequência e a magnitude dos eventos extremos e os dados meteorológicos e climáticos desde 1950: os principais desastres “naturais” (termo frequentemente utilizado, ao que pese o seu componente antropogênico) no Brasil têm sido relacionados a inundações, enxurradas, alagamentos, deslizamentos, estiagens, secas, incêndios florestais, mortes por descargas elétricas e destruição por vendavais (Alvalá; Barbieri, 2017). Assume-se que uma maior exposição da população às mudanças climáticas agravará tais riscos. Processos migratórios ou mobilidade intraurbana para assentamentos precários em áreas costeiras também deverão aumentar o estoque futuro de população em risco à elevação do nível do mar. Além da distribuição espacial com concentração de população em áreas cada vez mais vulneráveis aos extremos climáticos, a população que ocupará as áreas urbanas (e os assentamentos precários em particular) nas próximas décadas terá determinadas características demográficas, como, por exemplo, envelhecimento e acesso precário a saneamento (dadas as atuais taxas de investimento), que representarão fatores adicionais de agravos de vulnerabilidade.

Tais considerações sugerem que os riscos e impactos das mudanças climáticas são desiguais nas áreas urbanas em função das grandes diferenças em termos de vulnerabilidade e capacidade adaptativa. A essas heterogeneidades socioeconômicas e demográficas que caracterizam as populações urbanas, somam-se diferenças relacionadas às características dos biomas e aos impactos regionais das mudanças climáticas, tendo em vista a dimensão do Brasil. Há, nesse sentido, a necessidade de repensar mapeamentos de vulnerabilidades e políticas urbanas de adaptação contingentes às heterogeneidades socioambientais das macrorregiões, biomas, estados e municípios brasileiros.

As áreas urbanas da Amazônia e as grandes concentrações urbanas na região Sudeste exemplificam essas heterogeneidades. Na região amazônica brasileira, aproximadamente 80% da população está

concentrada em cidades devido a migrações em busca de melhores condições de educação, oportunidades de trabalho, saúde, bens e serviços. Em função do baixo poder econômico e, portanto, da inviabilidade de acesso a áreas de menor risco, essas populações se estabelecem em locais propensos a enchentes e com saneamento básico inadequado. Nessas áreas, o planejamento urbano ineficiente e as altas densidades populacionais aumentam os níveis de exposição aos desastres climáticos. Cerca de 41% do total populacional dos centros urbanos no delta e estuário amazônicos (DEA) está exposto a inundações. Em Santarém, por exemplo, a população e a infraestrutura da cidade estão altamente expostas a enchentes e inundações (Castellanos *et al.*, 2022).

A alta incidência de pobreza, o isolamento e a governança negligenciada dos povos tradicionais e indígenas no bioma amazônico os tornam altamente vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas. Entre os povos indígenas, medidas adaptativas autônomas locais podem não ser suficientes para evitar impactos significativos. As barreiras e capacidades adaptativas insuficientes também estão intrinsecamente ligadas à marginalização histórica e à vulnerabilidade dessa população (Birkmann *et al.*, 2022).

Os riscos dos eventos de secas e inundações extremas impõem limites à adaptação para a maioria das comunidades ribeirinhas na Amazônia, afetando desproporcionalmente pessoas e grupos sociais vulneráveis, como mulheres e crianças. Impactos residuais associados incluem perda de renda, pesca e produtividade agrícola, além de afetar a frequência escolar de crianças e promover a perda de lugar e da identidade de tais comunidades (Birkmann *et al.*, 2022). Ademais, as altas taxas de desmatamento e o aumento dos incêndios florestais na Amazônia estão expondo ainda mais os povos indígenas e as populações tradicionais a problemas de saúde e escassez de abastecimento de água doce (Birkmann *et al.*, 2022).

A região Sudeste apresenta o maior número absoluto de pessoas expostas a riscos, enquanto no Nordeste há o maior número proporcional (Saito *et al.*, 2019; de Souza *et al.*, 2019). Na região climática SES (Figura 1), devido ao crescimento desassociado de planejamento e políticas urbanas apropriadas, espera-se que 21,5 milhões de pessoas vivendo nas grandes cidades brasileiras, São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte, estejam expostas à escassez de água, apesar de sua ampla disponibilidade na região (Castellanos *et al.*, 2022). A expansão da mancha urbana, em função de atividades econômicas, estruturas habitacionais e infraestrutura, particularmente nas grandes cidades e regiões metropolitanas, constitui outro vetor importante de pressão sobre serviços ambientais e ecossistêmicos que cumprem papel fundamental tanto para o abastecimento hídrico quanto para a minimização dos impactos climáticos, como, por exemplo, a regulação de temperatura, qualidade do ar e escoamento de águas pluviais.

MIGRAÇÕES

Fatores climáticos interagem com fatores sociais, políticos, geopolíticos e econômicos. As mudanças climáticas e extremos climáticos comumente desencadeiam deslocamentos e migrações involuntárias, por exemplo, por secas extremas, tempestades tropicais, chuvas fortes e enchentes. O Brasil teve 295 mil pessoas deslocadas por conta de desastres climáticos em 2019, principalmente do meio rural para o urbano, sem planejamento e para áreas de alta vulnerabilidade (IPCC, 2022; Castellanos *et al.*, 2022).

O Nordeste brasileiro está entre as regiões mais sensíveis ao deslocamento e migrações relacionadas ao clima na América do Sul e América Central. Historicamente, secas intensas desencadearam migrações para centros urbanos dentro e fora de NES. Mais de 10 milhões de pessoas foram impactadas pela seca de 2012/2014 na região, que foi responsável pela escassez e contaminação da água, aumentando as mortes por diarreia (Castellanos *et al.*, 2022). Cenários futuros de mudanças climáticas combinadas aos efeitos de oscilação do El Niño podem desafiar a capacidade adaptativa local no semiárido, especialmente ao inviabilizar a agricultura familiar de subsistência e o abastecimento hídrico, gerando migrações tanto regionalmente (para as grandes cidades nordestinas) quanto para outras regiões brasileiras (Barbieri *et al.*, 2010).

RISCOS E DESASTRES

Entre 2010 e 2020, a mortalidade humana, devido a cheias, secas e tempestades, foi 15 vezes superior em regiões altamente vulneráveis em comparação com aquelas com vulnerabilidade muito baixa. Globalmente, em 2022, segundo a Base de Dados de Eventos de Emergência (EM-DAT) foram registrados 387 eventos de catástrofes, resultando na perda de mais de 30 mil vidas, impactos em 185 milhões de pessoas e perdas de cerca de US\$ 223 bilhões.

Segundo relatório da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2023), governos, comunidades, sociedade civil e a Organização das Nações Unidas precisam estar preparados em todos os níveis para reforçar a resiliência climática e a redução eficaz do risco de catástrofes. Ainda segundo a WMO (2023), entre as principais prioridades se inserem os esforços de preparação, incluindo sistemas de alerta precoce e preparação para emergências.

Análise disponibilizada em 2023 pela Confederação Nacional de Municípios (CNM) ressaltou que, nos últimos dez anos, 93% das cidades brasileiras (mais de cinco mil municípios) foram atingidas por

algum desastre hidrometeorológico que culminou com o registro de emergências ou estado de calamidade pública, em decorrência de tempestades, enxurradas, inundações urbanas e/ou deslizamentos de terra. Ainda segundo a CNM, de 2013 a 2022, mais de 2,2 milhões de casas foram danificadas em todo o país devido a esses acontecimentos, afetando diretamente mais de 4,2 milhões de pessoas, que tiveram de abandonar as suas casas em 2.640 municípios de todo o país.

Ressalta-se que, entre outubro de 2021 e fevereiro de 2023, fortes chuvas associadas a enchentes e deslizamentos de terra impactaram diversas cidades em diferentes regiões do país, como no sul da Bahia e em Minas Gerais; em Petrópolis (RJ) em fevereiro e março de 2022; na cidade do Recife, em maio-junho de 2022; e em São Sebastião, litoral norte do estado de São Paulo, em fevereiro de 2023, entre outros. Tais eventos culminaram em mais de 500 mortes no período (Marengo *et al.*, 2022, 2023; 2024; Alcantara *et al.*, 2023).

Portanto, para a eficiente e eficaz gestão de riscos e redução de riscos de desastres no Brasil, além da necessidade de se conhecerem as características demográficas e as condições de vida da população que vive em áreas de risco de deslizamentos de terra e/ou riscos hidrológicos e suas inserções nos sistemas de alertas precoces, são fundamentais a inserção, avaliação e atualização de índices de vulnerabilidade populacional para apoio ao monitoramento e a emissão de alertas precoces de risco de desastres no Brasil (Assis Dias *et al.*, 2020); a avaliação das vulnerabilidades e das capacidades de pequenos municípios brasileiros para redução dos riscos, principalmente aqueles relacionados a deslizamentos de terra e inundações (Ribeiro *et al.*, 2022); e a avaliação das resiliências comunitárias a desastres em pequenos centros urbanos brasileiros (Ribeiro *et al.*, 2023), uma vez que o Brasil se singulariza por um grande número de pequenas cidades em todas as regiões federativas (<https://adaptabrasil.mcti.gov.br/>) .

No contexto dos desastres deflagrados pela escassez de chuvas, a seca é um extremo climático originado pelo déficit de precipitação, que resulta na baixa disponibilidade hídrica para as diferentes atividades humanas (Wilhite & Glantz, 1987). Os efeitos da seca se acumulam lentamente ao longo de um período considerável de tempo e podem perdurar anos após a finalização do evento (Batista Júnior, 2012). Portanto, as secas podem causar graves implicações para os segmentos agrícola, ambiental e social.

No Brasil, a seca é um fenômeno caracterizado pela sua ampla cobertura espacial e recorrência, especialmente na região semiárida. A seca é uma

ameaça, na medida em que ocorre de forma intensiva e extensiva em áreas densamente povoadas, podendo resultar em desastres quando as capacidades locais são insuficientes para evitar danos significativos (Cunha *et al.*, 2018, 2019). A região semiárida possui a maior proporção de pessoas vivendo na pobreza no país. Entre os anos de 2012 e 2017, a região foi intensamente impactada por um processo prolongado de seca, já definido como o “evento” mais intenso dos últimos 30 anos (Brito *et al.*, 2017). Considerando os impactos acumulados entre 2012 e 2016, cerca de 1.100 municípios foram afetados (cerca de 20 milhões de pessoas atingidas por ano), principalmente com relação ao abastecimento de água e às perdas dos sistemas agrícolas, afetando dramaticamente a segurança alimentar de populações vulnerabilizadas.

Na região Centro-Oeste, as secas ocorridas entre os anos de 2020 e 2022 afetaram sobretudo a produção agrícola da região. A seca de 2014–2015 em São Paulo causou restrições hídricas em toda a região metropolitana de São Paulo (Nobre *et al.*, 2016). A região amazônica foi afetada por secas extremas em 1998, 2005, 2010 e 2015–2016 (Cunha *et al.*, 2019) e agora, em 2023, sendo alguns desses impactos consequência do El Niño. Também entre os anos de 2019 a 2022, a região Sul do Brasil foi afetada por um evento severo e prolongado de déficit hídrico, que causou impactos no abastecimento urbano em grandes cidades como, por exemplo, Curitiba, e na produção agrícola em grande parte da região (Fernandes *et al.*, 2021).

O aumento da temperatura média da atmosfera amplia o potencial de evaporação em áreas secas e/ou estações secas, podendo torná-las ainda mais secas, ao mesmo tempo que carrega mais umidade, podendo ocasionar chuvas mais intensas em regiões úmidas e/ou estações chuvosas. Com isso, é esperado que haja um aumento nos extremos de precipitação, tanto de chuvas escassas quanto de chuvas extremas. Esse aumento nos eventos extremos, combinado com uma maior exposição e vulnerabilidade da população brasileira, tem levado à maior ocorrência de desastres naturais no Brasil. Secas e estiagens têm aumentado no Norte, Nordeste e Centro-Oeste do Brasil, enquanto inundações, enchentes e deslizamentos de terra têm sido mais frequentes e intensos em áreas urbanas do Sul, Sudeste e ao longo da costa do Nordeste (Seneviratne *et al.*, 2022). Inundações também estão sendo mais frequentes em algumas áreas da Amazônia na estação chuvosa.

No Brasil, em geral, deslizamentos de terra e inundações são responsáveis pela maioria das mortes relacionadas ao clima. Eventos extremos, incluindo tempestades, e inundações/enchentes costeiras, causam impactos e perdas econômicas e ambientais da linha costeira

urbanizada do Brasil (Castellanos *et al.*, 2022). Em termos de projeções, embora com baixa confiabilidade devido à inabilidade dos modelos climáticos de simular o clima da América do Sul, é esperado que a estação seca se torne mais longa em várias regiões do Brasil e que, durante a estação chuvosa, ocorram chuvas mais intensas em períodos menores. Isso pode levar a um aumento ainda mais significativo na ocorrência de desastres naturais no Brasil (Seneviratne *et al.*, 2022).

AGRICULTURA

Os múltiplos choques de eventos extremos do clima reduzem o rendimento de colheitas (Cissé *et al.*, 2022). Na Amazônia, secas severas e inundações devidas às mudanças climáticas estão impondo limites de adaptação da maioria das comunidades ribeirinhas e pequenos agricultores familiares, causando impactos associados a perda de renda, pescado e produtividade agrícola (Birkmann *et al.*, 2022). No Nordeste, 70 mil km² de terra já atingiram um ponto em que a agricultura não é mais possível, devido ao aumento da seca, acompanhado de práticas de manejo de solo inadequadas. Os efeitos da seca intensa vêm sendo reportados desde 1780 no Nordeste, com perdas severas na produção agrícola, mortalidade de rebanhos e aumento nos preços. A população rural já sofre com a escassez de água natural da região, porém a seca de 2012 foi responsável pela redução de até 99% da produção de milho de Pernambuco (Castellanos *et al.*, 2022).

De acordo com Carvalho *et al.* (2020), secas e estiagens atingiram a região Nordeste de forma mais intensa nos anos 2010, 2012, 2014 e 2017, ocasionando reduções na pluviometria que variaram entre 15% e 70%. Esses períodos de seca afetaram diretamente a produção agrícola, conforme pode ser observado em estudo realizado para a Bacia Estendida do Rio São Francisco (Besf), o que gerou índices de perdas do plantio até a pré-colheita das principais culturas presentes na Besf, entre 2005 e 2017 (Santos *et al.*, 2022). Os resultados evidenciam que os índices de perda podem alcançar níveis próximos e acima de 30%, conforme ocorreu nas culturas de feijão, mandioca e milho, o que obviamente impacta significativamente toda a cadeia produtiva. Observou-se, também, que os anos de 2012 e 2015 a 2017 foram os mais críticos para quase todas as culturas. No ano de 2012 houve perdas elevadas em todas as culturas (exceto na soja), enquanto o período entre 2015 e 2017 foi marcado por perdas significativas, como, por exemplo, no arroz, feijão e milho (Figura 6).

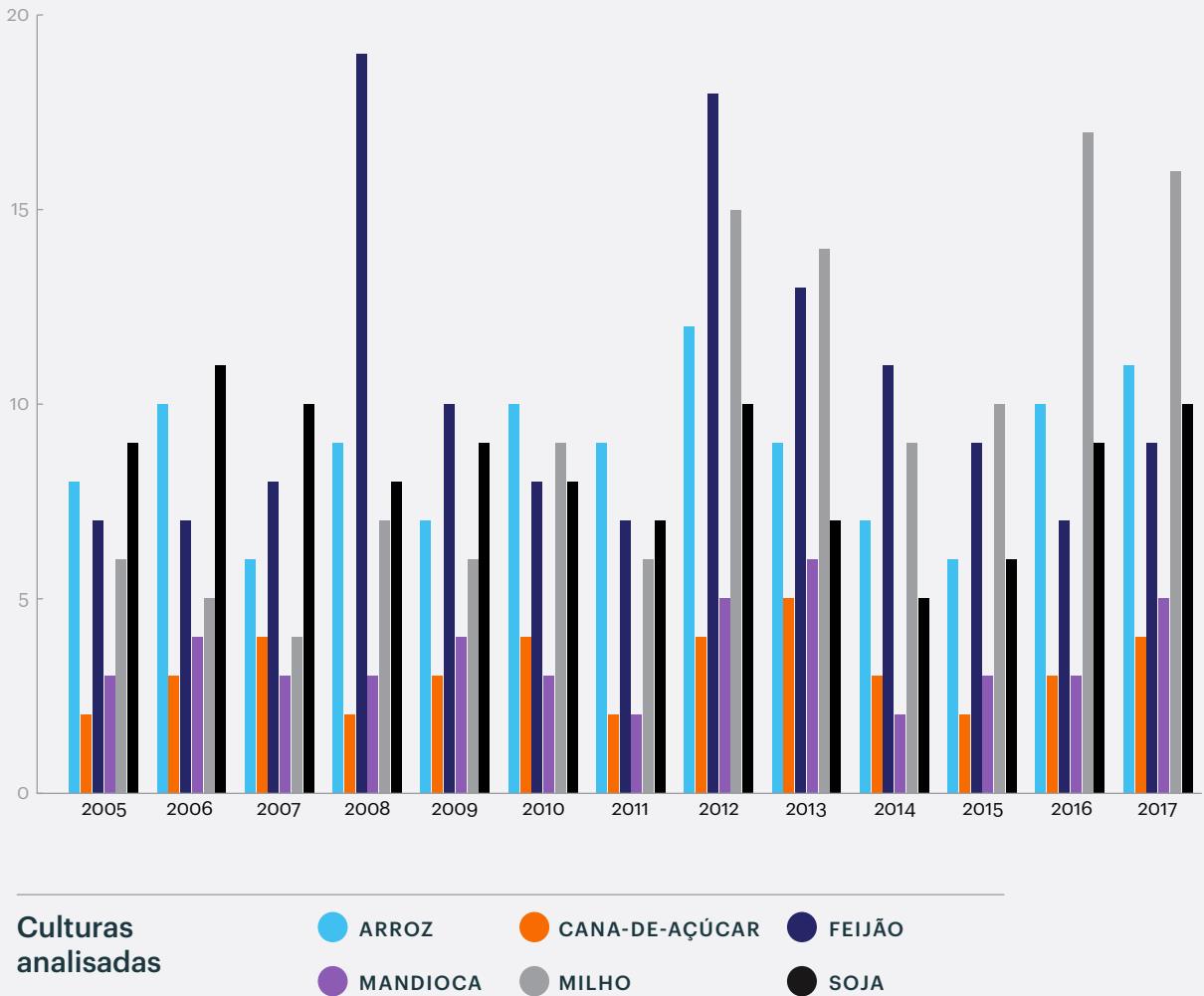


FIGURA 6: Índices de perdas do plantio até a pré-colheita das principais culturas presentes na Besf entre 2005 e 2017.

Exemplos mais específicos mostram que o impacto localizado das secas foi ainda mais severo. Carvalho *et al.* (2020) citou perdas na produção de feijão em Araripina, Pernambuco, de 99,4% em 2012. Castellanos *et al.* (2022) também apontou que a seca de 2012 foi responsável pela redução de até 99% da produção de milho de Pernambuco. No Rio Grande do Norte, entre 2012 e 2016, observaram-se perdas na produção de grãos que variaram entre 72,6% e 92,9%.

Apesar do aumento de chuvas observado na região (SES), secas extremas e longas vêm sendo cada vez mais frequentes, afetando o fornecimento de comida, a subsistência rural e a economia nas principais capitais da região, como Rio de Janeiro, São Paulo e Belo Horizonte, e impactando principalmente o estado de Minas Gerais. Durante as secas de 2014 e 2016, os preços agrícolas aumentaram em 30% em alguns casos, e os rendimentos de colheita de cana-de-açúcar, café e

frutas sofreram uma redução de 15% a 40% na região (Castellanos *et al.*, 2022). Não apenas a produção agrícola convencional de *commodities* sofre os impactos do clima. A agricultura familiar brasileira, que é operada por produtores com propriedades pequenas e que dependem principalmente da mão de obra familiar, também está sob risco dos impactos das mudanças climáticas (Birkmann *et al.*, 2022).

BIODIVERSIDADE E SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS

O desmatamento e a degradação florestal têm efeitos negativos no estoque de carbono das florestas tropicais e aumentam os efeitos das mudanças climáticas sobre a provisão de serviços ecossistêmicos e a biodiversidade (Pörtner *et al.*, 2022). Enquanto isso, a mudança climática antropogênica aumenta os incêndios florestais ao exacerbar seus principais fatores determinantes: calor, combustível e ignição. Incêndios são componentes naturais e essenciais de alguns ecossistemas florestais e terrestres, particularmente sistemas savânicos, porém emitem dióxido de carbono e, quando extremos e frequentes, podem danificar a integridade dos ecossistemas, além de matar pessoas, causar doenças respiratórias e destruir moradias e infraestrutura.

Na Amazônia, uma análise recente sugere que a degradação florestal está superando as taxas de desmatamento. A área queimada na Amazônia cresceu entre 1973 e 2014, coincidindo com o aumento do desmatamento. De 1981 a 2018, o desmatamento na Amazônia impactou o ciclo hidrológico e, localmente, a ocorrência de chuvas, aumentando a seca e desencadeando incêndios por retroalimentação. O ano de 2019 foi marcado por incêndios extremos, sendo que 85% da área incendiada da Amazônia coincide com áreas desmatadas em 2018. A presença de estradas facilita o desmatamento, fragmentando a floresta e aumentando a aridez e a inflamabilidade da vegetação. Aqui, desmatamento, estradas e a ocorrência de períodos prolongados e intensos de seca (como provocados pelo ENSO) são fatores determinantes.

A Amazônia passou a ser um emissor de carbono devido principalmente à expansão da agricultura e pecuária, que foram responsáveis por dois terços do desmatamento entre 1990 e 2005. Entre 2010 e 2019, a Amazônia perdeu 0.5 GtC/ano devido principalmente à degradação da floresta (Parmesan *et al.*, 2022). Os motivos para degradação e desmatamento florestal variam de acordo com a região, sendo a extração de madeira a causa mais comum no Brasil. Os impactos observados a partir do aumento da degradação florestal incluem a perda da capacidade de geração de energia hidrelétrica, da produção agrícola da cultura indígena e o aumento de doenças tropicais (Ometto *et al.*, 2022).

É importante esclarecer que as florestas tropicais contêm os maiores estoques de carbono na vegetação terrestre do mundo. Estima-se que a Floresta Amazônica brasileira contenha um estoque de 45-75 GtC na biomassa aérea. Porém, o desmatamento na região, entre 2001 e 2005, contribuiu para a emissão de 0.17 ± 0.05 GtC/ano, enquanto incêndios contribuíram com uma emissão de 0.12 ± 0.14 GtC/ano, de 2003 a 2015. Outras estimativas apontam para uma emissão de carbono de 0.5 Gt/ano no período de 2010-2019, devido ao desmatamento e, principalmente, à degradação dos ecossistemas. A Floresta Amazônica primária intacta foi um sumidouro de carbono entre 2000 e 2010, capturando -0.45 GtC/ano. Em contrapartida, entre 2010 e 2019 essas áreas podem ter sido uma fonte de emissão de carbono de 0.67 Gt/ano (Castellanos *et al.*, 2022). As mudanças climáticas estão alterando a estrutura e a composição de espécies de árvores tropicais, incluindo áreas de transições de florestas úmidas para florestas mais secas em regiões como a Amazônia. Além disso, há em curso o enfraquecimento do potencial de sumidouros de carbono das florestas tropicais na Amazônia (Ometto *et al.*, 2022). O aumento da mortalidade e redução do crescimento de árvores por eventos extremos do clima limita a capacidade de regeneração das florestas tropicais.

Em algumas localidades da Amazônia, o aumento da temperatura média anual de $1,2^{\circ}\text{C}$, ocorrido entre 1950 e 2018, contribuiu para a mortalidade de árvores em 40% para o período entre 1983 e 2011. O aumento da temperatura reduz o crescimento e acelera a mortalidade de árvores e estima-se que, a cada grau Celsius a mais, haja uma redução em 9,1 toneladas/ha nas densidades de carbono acima do solo em florestas tropicais (Castellanos *et al.*, 2022). Em algumas regiões, o aumento da mortalidade foi acompanhado pelo aumento de gêneros tolerantes à seca, entre 1985 e 2015. As secas extremas que ocorrem em épocas de ENOS, combinadas com a degradação da vegetação, causam eventos extremos de fogo e aumento da mortalidade de árvores (Parmesan *et al.*, 2022). A área da Amazônia brasileira exposta à seca extrema aumentou de 8% em 2004/2005 para 46% em 2015/2016, com seu epicentro na região central do bioma (Anderson *et al.*, 2018). Durante a seca extrema de 2015/2016, 10% ou mais da área da floresta Amazônica mostraram anomalias negativas do déficit hídrico cumulativo mínimo. A ocorrência de secas extremas levou ao aumento na concorrência e propagação de fogo na bacia. A exposição a incêndios anômalos em ecossistemas de savanas, como o Cerrado, que são mais suscetíveis ao fogo, aumenta a exposição e a vulnerabilidade de ecossistemas florestais adjacentes não adaptados ao fogo, como florestas inundadas sazonalmente (Castellanos *et al.*, 2022).

Os ecossistemas aquáticos também sofrem pressão das mudanças climáticas, as quais estão aumentando o risco de extinção das espécies aquáticas da Amazônia, já ameaçadas pela construção de barragens e poluição dos rios. Em 2023, o evento de seca extrema somado à forte onda de calor que atingiu a Amazônia desencadeou o registro de temperaturas próximas a 40°C em alguns lagos na Amazônia Central, ocasionando a mortandade de peixes em viveiros e lagos, inclusive do pirarucu (*Arapaima gigas*), espécie ameaçada e de importância para o manejo na região, bem como a mortandade sem precedentes de centenas de golfinhos de rio – boto-vermelho (*Inia geofrensis*) e tucuxis (*Sotalia fluviatilis*).

Ainda em relação aos ecossistemas terrestres brasileiros, a Caatinga tem alta biodiversidade e endemismo, e as espécies são vulneráveis à redução de hábitat devido tanto às mudanças climáticas quanto à expansão agrícola. Um terço da área da Caatinga tem alto potencial para desertificação (Silva & Barbosa, 2017), e a vegetação da Caatinga é particularmente sensível a variações na disponibilidade de água, elevando sua vulnerabilidade às mudanças climáticas, que é ainda mais agravada pela conversão extensiva da vegetação nativa. A Caatinga já perdeu quase 50% da sua cobertura vegetal original, com apenas 2% da vegetação remanescente dentro de unidades de conservação de proteção integral. Estudos com animais terrestres mostram que a perda de hábitat aumenta a vulnerabilidade das espécies às mudanças climáticas (Castellanos et al., 2022). Mudanças nos regimes de chuva, degradação do solo e desertificação são fatores que, combinados, fazem de NES uma das regiões mais vulneráveis às mudanças climáticas no mundo (Torres et al., 2017).

De modo geral, a biodiversidade do Nordeste é altamente ameaçada pelas mudanças climáticas, tanto em ecossistemas terrestres quanto em água doce e salgada (zonas estuarinas e costeiras). Há poucos estudos que projetam os possíveis impactos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade da região. Todavia, estudos recentes já reportaram uma redução em diversas espécies de plantas endêmicas, afetando a polinização e a dispersão de sementes.

ALTA BIODIVERSIDADE E ESTOQUE DE CARBONO, geralmente, estão diretamente associados. Florestas úmidas como a Amazônia contêm os maiores estoques de carbono na vegetação aérea e a maior riqueza de espécies de plantas vasculares no mundo. Na Amazônia, aproximadamente 1% das espécies de árvores contêm 50% do carbono aéreo, devido à abundância e altura máxima. Portanto, áreas protegidas na Amazônia brasileira, que segundo o Imazon hoje cobrem cerca de 43% (~2,1 milhões km²) do seu território, podem contemplar até metade dos estoques de carbono da vegetação aérea do Brasil, sendo responsáveis por apenas um décimo das emissões líquidas. A conservação de áreas de alta biodiversidade, particularmente em áreas protegidas, conserva o carbono dos ecossistemas, contribuindo para a redução das emissões na atmosfera e reduzindo a magnitude dos efeitos das mudanças climáticas (Castellanos et al., 2022).

Para o ambiente aquático não é muito diferente, 52% dos peixes de água doce do Nordeste (203 espécies) são endêmicos e estão expostos às reduções de fluxo de rios previsíveis devido às mudanças climáticas. Além disso, estudos sobre animais terrestres preveem que a maioria dos grupos será negativamente impactada pelas mudanças climáticas.

As águas costeiras do Nordeste fazem parte de uma ecorregião marinha específica por conta de sua singularidade. A região é responsável por 99% da produção brasileira de camarão, que está exposta ao aumento do nível do mar e da temperatura e à acidificação do oceano. Além disso, a maioria dos recifes de corais do oceano Atlântico Sul está distribuída ao longo da costa do Nordeste, aumentando seu valor conservacionista e turístico. Os 685 km² de recifes de corais ao longo dessa costa (valor provavelmente subestimado) estão expostos ao aumento das temperaturas do oceano. Os recifes de corais nessa região têm demonstrado alguma resiliência ao branqueamento, mas sua vulnerabilidade é intensificada pela sinergia entre o estresse térmico crônico causado pelo aumento da temperatura da superfície do mar e outros estressores bem documentados, como escoamento costeiro, desenvolvimento urbano, turismo marinho, superexploração dos organismos recifais e extração de petróleo (Castellanos *et al.*, 2022).

Mudanças na abundância de comunidades de recifes de coral e redução extrema na cobertura de corais já foram observadas no Nordeste. Uma série de eventos de branqueamento de corais associados ao aumento anormal da temperatura do mar ocorreu na região, mas até o momento a mortalidade permaneceu baixa e os corais foram capazes de retornar às condições normais, ou permaneceram estáveis após o aumento da temperatura do mar. Alguns manguezais da região Amazônica mostraram aumento da mortalidade, além de expandirem sua distribuição para o interior.

O Cerrado brasileiro é uma das savanas mais diversas do mundo, com mais de 12,6 mil espécies de plantas, entre as quais 35% são endêmicas. A mudança de uso e cobertura do solo, aliada à mudança climática em curso, impactou fortemente sua biodiversidade e levou 657 espécies de plantas à extinção nesse bioma, mais do que quatro vezes o recorde global de extinção de espécies (Strassburg *et al.*, 2017). Os efeitos das mudanças climáticas, expressos por secas e ondas de calor, causam estresse às plantas, comprometendo seu crescimento e aumentando a mortalidade.

Os sistemas naturais no Sudeste também estão expostos às mudanças climáticas. A região abriga dois importantes *hotspots* de biodiversidade com altos níveis de endemismos: o Cerrado e a Mata Atlântica, onde cerca de 72% das espécies brasileiras ameaçadas se encontram (Castellanos *et al.*, 2022).

FINANCIAMENTO

No âmbito internacional, ficou cunhado na Convenção do Clima que os países desenvolvidos deveriam financiar com empréstimos e doações as ações de enfrentamento à mudança do clima em países em desenvolvimento, caso do Brasil, estabelecendo em seu artigo 11 um mecanismo de financiamento. Esse mecanismo inclui fundos especiais e as suas entidades operacionais: o Fundo Global para o Ambiente (GEF), que imediatamente operou para gerir os recursos necessários para o cumprimento das obrigações da convenção e, mais recentemente, o Fundo Verde para o Clima (GCF, na sigla em inglês).

O GCF foi criado com a promessa de gerir um fluxo de recursos, provenientes de contribuições dos países desenvolvidos, de US\$ 100 bilhões anuais, e atua como entidade operacional do Mecanismo Financeiro da Convenção. O BNDES, a Caixa Econômica Federal e o Funbio são entidades acreditadas brasileiras para gerir recursos de projetos aprovados no GCF. O fundo é governado pelo conselho do GCF e recebe orientação da Conferência das Partes da Convenção do Clima. O fundo apoia projetos, programas, políticas e outras atividades em países em desenvolvimento usando linhas de financiamento temáticas.

Além disso, o GCF serve ao Acordo de Paris em conformidade com o Artigo 9, parágrafo 8. Já o Artigo 9, parágrafo 9 do Acordo de Paris estabelece que as entidades operacionais do Mecanismo Financeiro da convenção terão como objetivo garantir o acesso eficiente aos recursos financeiros através de procedimentos de aprovação simplificados e maior apoio e prontidão para países em desenvolvimento, em particular os menos desenvolvidos (LDC, na sigla em inglês) e pequenos estados insulares em desenvolvimento (PEID ou SIDS, na sigla em inglês), no contexto das suas estratégias e planos climáticos nacionais.

Antes da criação do GCF, que se deu com base em difíceis acordos sob a convenção, os Fundos de Investimento para o Clima (CIF), já operavam como uma espécie de laboratório do mecanismo financeiro da convenção por bancos multilaterais de desenvolvimento, sob a liderança do Banco Mundial. Os CIF continuam recebendo doações e operando, sendo o Brasil beneficiário através do FIP Brasil (Programa de Investimentos em Floresta, em inglês), que lida com a questão florestal. Recentemente foi aprovado um plano de investimentos para o Brasil na linha de integração de energias renováveis, o CIF REI, da ordem de US\$ 70 milhões.

Há ainda um Fundo de Adaptação, do qual o Brasil ainda não é um tomador, apesar de poder tomar US\$ 10 milhões anuais. Esse fundo havia

sido criado inicialmente para atender os LDC, sendo alimentado com 2% dos créditos de carbono do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), mas atualmente está financiando todos os países em desenvolvimento e recebe doações diretamente de países desenvolvidos. Houve uma decisão na convenção para que fosse criado um fundo específico para perdas e danos consequentes da mudança do clima, mas este ainda não está operacional.

O Fundo Amazônia se mostrou desde 2012 um importante mecanismo para ações de redução do desmatamento, financiando políticas ambientais por compensação baseada em resultado. Iniciativas de conservação também vêm crescendo na região, incluindo Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA), REDD+, certificação ambiental e ações voluntárias de conservação, embora mais estudos sejam necessários para compreender sua efetividade, possíveis efeitos colaterais negativos e processos de tomada de decisão (Castellanos *et al.*, 2022).

Entre 2015 e 2016, a América Latina e Caribe obtiveram 22% do financiamento de fundos multilaterais climáticos, entre os quais cerca de 76% destinados a projetos de mitigação e apenas 24% a projetos de adaptação. Entre 2003 e 2019, o Brasil foi o principal destinatário, com US\$ 195 milhões, com destaque para o Green Climate Fund, o Clean Technology Fund e o Fundo Amazônia (Castellanos *et al.*, 2022).

O Programa de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Programa ABC) é um destaque nas políticas de mitigação de emissões de GEE na agricultura. O Programa ABC financia práticas para reduzir as emissões do setor agropecuário, sendo responsável por 15% de todo o portfólio financeiro oficial, embora ainda haja desafios para seu desenvolvimento (Castellanos *et al.*, 2022). Uma importante dificuldade tem sido o acesso por pequenos agricultores familiares, uma vez que o programa tem atingido com maior frequência produtores de agricultura em larga escala (Niemeyer & Vale, 2022). Outrossim, menos de 2% do Plano Safra, que inclui linhas de crédito e incentivos para apoiar o setor agropecuário no país, foi destinado ao Plano ABC entre 2021 e 2022, reduzindo seu potencial para mitigar as mudanças climáticas.

Recentemente, por ocasião da 28ª Conferência das Partes da Convenção do Clima (COP28), houve o anúncio do estabelecimento de um fundo financeiro dedicado a mitigar os impactos das mudanças climáticas sobre as nações mais vulneráveis. Três décadas de negociações foram necessárias, e as primeiras contribuições voluntárias de países como Japão, Reino Unido, Alemanha e Emirados Árabes Unidos totalizam US\$ 420 milhões. Trata-se do Fundo de Perdas e Danos, cuja operacionalização ficará sob a responsabilidade do Banco Mundial e contará, para sua

governança, com um conselho composto por 26 membros, dos quais 12 membros virão de nações desenvolvidas e 14 virão de nações em desenvolvimento ou emergentes. Além de prover recursos para que populações afetadas invistam em migração, obtenção de informações e aumento de resiliência em infraestrutura vulnerável, há igualmente a possibilidade de se investir na erradicação da pobreza.

É digno de nota que os recursos disponíveis nacional e internacionalmente para lidar com as complexas demandas postas pelas mudanças climáticas estão muito aquém do necessário. Essa insuficiência compromete severamente os esforços em prol da sustentabilidade ambiental. Soma-se a isso o fato de que a maioria dos fundos disponíveis se direciona predominantemente a estratégias de mitigação, relegando as ações de adaptação a um estado de sub-financiamento crítico. A mitigação, embora crucial para conter as emissões de gases de efeito estufa, não deve eclipsar a urgência e a importância da adaptação, que visa proteger comunidades vulneráveis e sistemas naturais já impactados pelas alterações climáticas. A falta de equidade na distribuição de recursos seguramente perpetua desigualdades, pois as populações mais afetadas muitas vezes carecem dos meios financeiros necessários para enfrentar os desafios imediatos impostos pelas mudanças climáticas. Portanto, é imperativo não só disponibilizar mais recursos como também reequilibrar os investimentos, direcionando uma parcela significativa para estratégias adaptativas.

4

O QUE DESPERAR PARA O “AMANHÃ”

Neste item, constam os resultados das avaliações sobre as perspectivas de mudanças climáticas futuras e os riscos relacionados.

CLIMA FUTURO

Podem ocorrer mudanças na estação seca na parte central da América do Sul, devido ao início e recuo tardios das monções, além da diminuição da precipitação sobre a Amazônia e o Brasil central. Espera-se também aumento na frequência e na extensão geográfica da seca meteorológica na Amazônia Oriental, composta pelos estados do Amazonas, Acre, Rondônia e Roraima, e o oposto na porção Ocidental, que abrange os estados do Pará, Maranhão, Amapá, Tocantins e Mato Grosso.

Considerando um aumento de 2°C na temperatura média global, o país poderá sofrer redução da precipitação anual total, a despeito do aumento de tempestades e de uma probabilidade até quatro vezes maior de ocorrerem secas severas em diversas regiões do país. Espera-se que esse nível de aquecimento global até 2050 leve à redução significativa do fluxo nos principais rios da bacia amazônica, ocasionando dificuldade no acesso à água e alimentos para as populações locais, com impacto significativo na subsistência das comunidades (Birkmann *et al.*, 2022). Em 2100, essa alteração na temperatura do planeta poderá levar à redução de chuvas em 22% em NES, impactando o acesso à água para abastecimento e produção de energia hidrelétrica, e gerando um aumento de 25% no SES (regiões NES e SES descritas na Figura 4).

Os eventos extremos de precipitação, que resultam em enxurradas e deslizamentos, deverão se intensificar em magnitude e frequência. Eles representam risco à vida e à infraestrutura. O aquecimento de 1,5°C na temperatura média poderá aumentar entre 100% e 200% a população afetada por enxurradas no Brasil.

Em NES, as projeções apontam para o aumento dos eventos extremos de precipitação e das secas. A intensificação da severidade das secas, devido à combinação do aumento das temperaturas, redução das chuvas e menor umidade do ar (5% a 15% de redução da umidade relativa), gerará déficit hídrico, projetado para toda a região a partir de 2041 (redução de 3-4mm/dia), particularmente na porção oeste de NES e sobre a região semiárida. Como consequência, deverá haver um aumento significativo dos incêndios florestais.

No oceano, as projeções de cenários futuros sugerem aumento do volume de água transportado pela Corrente do Brasil, quando comparado com o cenário atual (Pontes *et al.*, 2016; Toste *et al.*, 2018). Usando um cenário moderado (RCP4.5), que prevê uma concentração de CO₂ atmosférico de 538 ppm em 2100 e um

aumento da temperatura de cerca de 2°C acima da média do período histórico (1850-1900), a temperatura média na superfície do mar (TSM) deve atingir valores até 2°C acima da média atual, especialmente em regiões próximas à costa ao norte de 16° S de latitude, com uma média de aumento do nível do mar de 7,3 mm/ano. Os resultados das simulações de modelos usando o cenário mais extremo (RCP8.5), que prevê a forçante radiativa equivalente a uma concentração atmosférica de 1.370ppm de CO₂ em 2100, sugerem que o aumento do volume de calor e sal transportado pela Corrente do Brasil em direção ao Sul poderá afetar o clima ao longo de toda a costa no Brasil, especialmente ao Sul de 30°S (Pontes *et al.*, 2016).

Essas alterações devem causar processos localizados de tropicalização (expansão de ecossistemas e biota tropical para áreas fora dos trópicos, já que as extratropicais passam a ter condições mais próximas das tropicais). No Brasil, modelos matemáticos indicam que espécies tropicais de polvos (Lima *et al.*, 2020), peixes herbívoros (Inagaki *et al.*, 2020, Lima *et al.*, 2021) e corais (Bleuel *et al.*, 2021) encontrarão condições favoráveis à sua ocorrência em ecossistemas subtropicais até o final deste século.

Por outro lado, as condições em áreas tropicais podem se tornar insustentáveis, com riscos de extinções ou reduções drásticas na biodiversidade. As teias alimentares de recifes tropicais brasileiros devem se tornar menos eficientes na ciclagem de energia, nutrientes e matéria, sofrendo uma simplificação drástica acompanhada de perda de biomassa de peixes e invertebrados (Capitani *et al.*, 2021). Os estoques de lagostas, por exemplo, hoje bastante comuns na região Nordeste do Brasil, onde são também uma importante fonte de renda, deverão diminuir drasticamente nesta região até 2100, caso o cenário atual de emissão de gases não seja significativamente reduzido (Boavida-Portugal *et al.*, 2018). Os próprios peixes herbívoros e corais, que encontrarão ambientes mais adequados fora dos trópicos futuramente, serão prejudicados em regiões tropicais (Inagaki *et al.*, 2020; Bleuel *et al.*, 2021). A perda e diminuição de peixes herbívoros e de corais em regiões tropicais pode alterar drasticamente a paisagem dos recifes tropicais brasileiros, resultando em um ambiente menos complexo e diverso, o que coloca em risco benefícios importantes que usufruímos a partir desses ecossistemas, como a pesca (Franco *et al.*, 2020, Lopes *et al.*, 2018) e o turismo.

A FIGURA 7 apresenta uma síntese dos impactos observados e projetados para a América (IPCC, 2022)

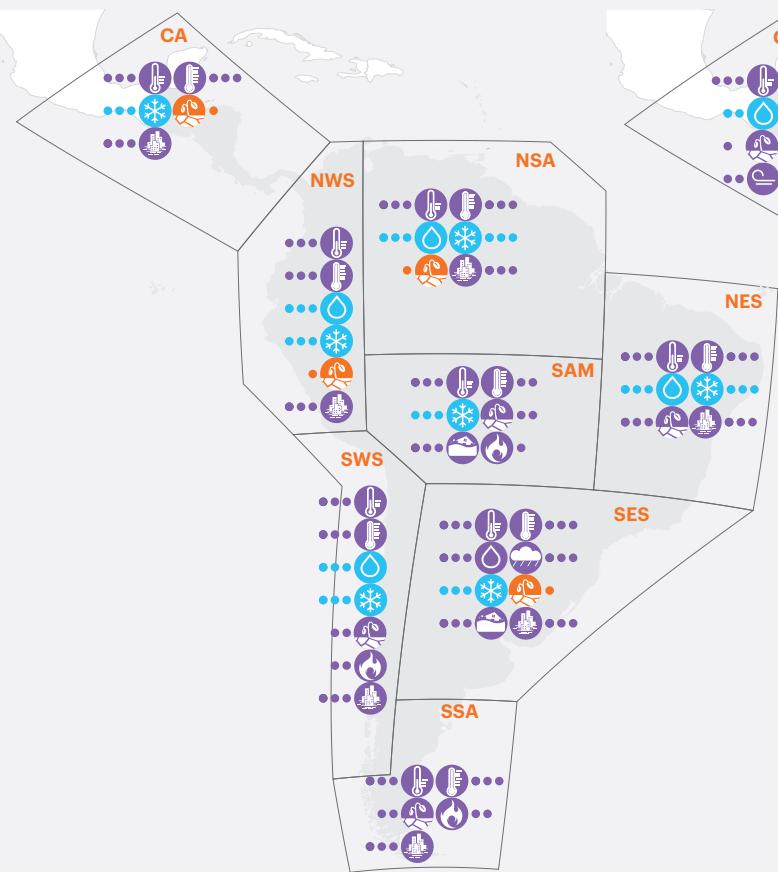
Riscos observados e projetados na América do Sul e América Central

Riscos

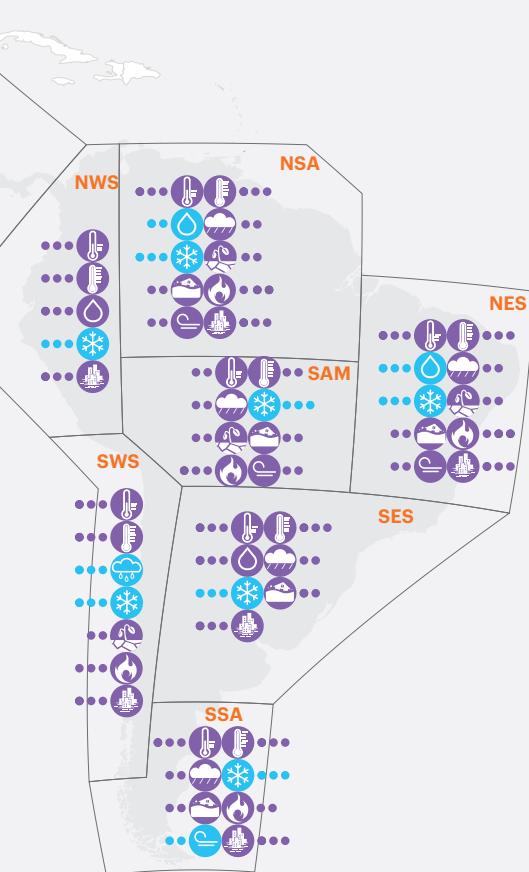
- | | |
|--|---|
|  Temperatura média |  Extremos de calor |
|  Ondas de frio e geadas |  Precipitação média |
|  Precipitação extrema |  Secas, baixa umidade e aridez |
|  Enxurradas e deslizamentos |  Incêndios florestais |
|  Velocidade do vento |  Nível do mar |

- CA** América Central
NWS Noroeste da América do Sul
NSA Norte da América do Sul
SSM Região da Monção da América do Sul
NES Nordeste da América do Sul
SES Sudoeste da América do Sul
SWS Sudeste da América do Sul
SSA Sul da América do Sul

Observado



Projetado



Nível de confiança na atribuição

BAIXA

MÉDIA

ALTA

Direção do risco

AUMENTO

AUMENTO E REDUÇÃO

DIMINUI

MIGRAÇÕES HUMANAS

É estimado que a cada grau Celsius adicional de aquecimento aumentam os riscos de eventos de inundações, que poderão causar, até 2050, migrações forçadas de comunidades. O aumento da frequência de eventos de calor extremo e das temperaturas médias representa riscos para a segurança habitacional em regiões expostas. Cenários que combinam altas emissões de GEE e baixo desenvolvimento socioeconômico indicam um aumento do potencial de migração involuntária, tanto nacionalmente quanto entre diferentes regiões do planeta, e mesmo entre países. Espera-se que pelo menos 0,9 milhão de pessoas irão migrar inter-regionalmente no Brasil devido às condições climáticas futuras. Todas as alterações climáticas previamente mencionadas terão efeitos significativos sobre os processos migratórios em NES, atingindo sobretudo a população mais vulnerável.

SAÚDE HUMANA

As mudanças climáticas e os eventos extremos relacionados aumentarão significativamente os problemas de saúde e o número de mortes prematuras de curto a longo prazo. O aumento do calor, da desnutrição, a malária e as doenças diarreicas poderão causar milhares de mortes por ano até 2050. Adicionalmente, doenças transmitidas por alimentos contaminados, pela água e por vetores serão favorecidas pelas mudanças climáticas e eventos climáticos extremos.

De acordo com os cenários climáticos futuros, as mortes por doenças cardiovasculares (DCV) poderão aumentar em até 8,6% no Brasil (em cenários de altas emissões de GEE – RCP8.5) até o final do século. Poderá haver um aumento das populações de *Aedes aegypti*, espacial e temporal (número de meses propícios para a transmissão de dengue na região do SES), até 2050. Eventos climáticos extremos, como ondas de calor, aumento da umidade relativa do ar e das tempestades, poderão favorecer novos surtos de influenza.

Fatores como a exposição a eventos climáticos extremos, a migração forçada, o aumento da fome e da desnutrição trarão impactos relativos à saúde mental, como aumento de diagnósticos de ansiedade e de depressão. O crescimento desordenado ou o envelhecimento da população podem aumentar as diferenças geográficas dos óbitos relacionados aos eventos climáticos extremos ainda neste século. A degradação dos sistemas de saúde e de assistência social, as perdas socioeconômicas e o aumento de casos de ansiedade e angústia decorrentes dos eventos climáticos extremos poderão impactar a saúde mental bem como as relações interpessoais e socioculturais da população, incluindo as populações tradicionais.

Por exemplo, projeções para 2071 a 2099 indicam que condições térmicas podem se agravar para vetores de dengue, chikungunya e zika, além de aumentar a mortalidade por estresse climático na bacia do rio São Francisco (Castellanos et al., 2022).

COMUNIDADES VULNERÁVEIS

Fatores como gênero, acesso à moradia, meios de subsistência, dependência dos recursos florestais para alimentação e mudança no uso do solo poderão contribuir para o aumento da vulnerabilidade de povos indígenas e de comunidades rurais, afetando os riscos e impactos aos quais tais grupos estarão expostos. Há impactos projetados sobre a segurança alimentar, hídrica e energética em todo o Brasil, o que afetará principalmente os mais vulneráveis.

As crianças, por estarem ainda em desenvolvimento, são potencialmente mais suscetíveis a alterações em seu meio ambiente. Problemas como poluição, escassez de alimentos, água não potável ou falta de saneamento básico, agravados por migrações de áreas rurais para periferias precárias em diversas cidades do país, ou eventos meteorológicos como secas, enchentes e ondas de calor, podem atingi-las de modo mais severo. Atualmente, segundo relatório do Unicef, 40 milhões de crianças no Brasil estão expostas a um ou mais riscos climáticos (Unicef, 2022).

Em relação à população urbana, o aumento da temperatura média irá expor as populações das grandes cidades ao calor extremo. Ilhas de calor urbanas já são uma realidade nas cidades grandes do SES, como é o caso de Rio de Janeiro e São Paulo, que possuem regiões de periferia urbana com alta densidade populacional, com impactos sobre a saúde humana. Inundações devido ao aumento do nível do mar também são projetadas para impactar cidades costeiras, possivelmente destruindo construções urbanas (Castellanos et al., 2022).

AGROPECUÁRIA E SEGURANÇA ALIMENTAR

Há projeções de fortes impactos negativos sobre a agricultura de vários países e regiões (Tabela 1). A região do NES concentra o maior volume de perdas previstas sobre o Produto Interno Bruto (PIB) associado à agricultura brasileira. As perdas econômicas relacionadas aos impactos na agricultura poderão afetar severamente famílias rurais, encolhendo o mercado de trabalho agrícola e aumentando o preço dos alimentos.

TABELA 1:**Alteração percentual média no período de crescimento de diversas culturas agrícolas em regiões climáticas da América do Sul**

Para o período de 2015 a 2019, tendo como referência o período de 1981 a 2010. Com o aumento da temperatura, a temperatura acumulada total (ATT, do inglês) é atingida antecipadamente (valores negativos mais altos). Com isso, a cultura atinge seu ponto de maturação mais rapidamente, consequentemente, levando a menores produtividades. (Romanello *et al.*, 2021)

REGIÃO	TRIGO DE PRIMAVERA	ARROZ	MILHO	SOJA
América Central (AC)	Sem informação	-1,9%	-5,0%	-4,7%
Noroeste da América do Sul (NWS)	-5,2%	-5,2%	-5,6%	-3,1%
Norte da América do Sul (NSA)	NP	-0,7%	-3,1%	0,0%
Monção América do Sul (SAM)	-0,7%	-1,4%	-2,9%	-1,5%
Nordeste da América do Sul (NES)	-1,3%	-0,7%	-3,5%	-2,6%
Sudeste da América do Sul (SES)	-3,5%	-2,3%	-2,4%	-2,7%
Sudoeste da América do Sul (SWS)	-5,2%	-10,0%	-5,2%	Sem informação
Sul da América do Sul (SSA)	-6,5%	Sem informação	-1,6%	Sem informação

Os cultivos de soja e milho na região do Cerrado sofrerão impactos negativos de rendimentos da produção e exigirão altos níveis de investimentos em adaptação. Alterações nos padrões de precipitação estão relacionados a reduções da produtividade e da receita agrícola na porção sul da região Amazônica, que devem se agravar em cenários futuros de mudanças climáticas. Assim, o destino socioeconômico da região será impactado pela instabilidade do clima regional e pelas eventuais flutuações do mercado global sobre a cadeia de alimentos agrícolas.

Diferentes estudos apontam que, para atender às demandas de produção de etanol e açúcar, a área de cultivo da cana-de-açúcar deverá aumentar entre 1,3 milhão e 2,7 milhões de hectares nos próximos dez anos (atualmente a área é de 8,3 milhões de hectares), podendo chegar a 14 milhões de hectares em 2050. Tal aumento será importante para a mitigação das emissões de GEE do setor energético no Brasil, porém poderá alterar a dinâmica de uso da terra, sobretudo no bioma Cerrado, impulsionando as emissões de GEEs. No que se refere à segurança alimentar, o aumento no cultivo de cana-de-açúcar pode gerar algum impacto negativo em escalas regionais, visto que a cana-de-açúcar pode ocupar áreas de culturas de interesse alimentar.

Porém, nacionalmente, os impactos devem ser diluídos devido a aspectos como aumento da produtividade das culturas e a perspectiva de uso de áreas atualmente degradadas ou mal manejadas, o que vai ao encontro, por exemplo, do Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis (PNCPD), o qual visa incentivar a recuperação e conversão de até 40 milhões de hectares de pastagens de baixa produtividade em áreas agricultáveis nos próximos dez anos.

Para a soja também há a perspectiva de um aumento substancial na área cultivada nos próximos dez anos, e parte disso será para atender à demanda por biodiesel. Atualmente, 70% do biodiesel brasileiro é proveniente da soja, e isto deve aumentar, uma vez que o governo aprovou recentemente a elevação gradual do percentual de biodiesel no óleo diesel. A mistura de biodiesel, que é de 10% atualmente, deverá atingir 15% em 2026, o que vai demandar que a produção nacional passe dos atuais 6,3 bilhões de litros anuais para mais de 10 bilhões. No entanto, visando diminuir o impacto sobre a segurança alimentar, a resolução que prevê o aumento da mistura do biodiesel no diesel comum também previu um aumento do fomento à produção do biocombustível, em parceria com a agricultura familiar, nas regiões Norte, Nordeste e no semiárido brasileiro.

ECOSSISTEMAS E BIODIVERSIDADE

São esperadas grandes mudanças na estrutura e na composição dos biomas terrestres em resposta às mudanças climáticas e ao aumento de CO₂ na atmosfera. Essas mudanças podem ter impactos sobre a provisão de serviços ecossistêmicos e biodiversidade.

Ainda que a elevação da temperatura média continue constante até 2100, os impactos continuarão a ocorrer nos anos subsequentes, incluindo a perda contínua da Floresta Amazônica. Esses estudos enfatizam a importância de uma perspectiva de várias décadas, ou mesmo séculos, ao explorar os impactos de decisões políticas tomadas hoje a respeito da mitigação climática. Há evidências de que, mesmo atingindo as metas climáticas, alguns ecossistemas, como os do bioma Amazônia, por exemplo, irão sofrer mudanças de longo prazo na biodiversidade e nos processos ecossistêmicos.

A forma como as espécies podem responder às mudanças climáticas futuras ainda é uma questão bastante investigada. A resposta mais drástica é que as espécies simplesmente não conseguirão se adaptar às novas condições climáticas, ou migrar para locais onde as condições ambientais estejam apropriadas, e acabarão se extinguindo (por exemplo, espécies arbóreas). Embora as previsões de risco de extinção de espécies por conta das mudanças climáticas variem amplamente, a América do Sul é a região do planeta com os maiores riscos dessa natureza. De forma geral, espécies endêmicas, com áreas de distribuição mais restritas e de certos grupos taxonômicos (anfíbios, répteis e invertebrados), estão sob os maiores riscos de serem extintas.

Para as espécies que conseguirem se adaptar ou migrar para áreas com condições ambientais adequadas, as mudanças climáticas podem diminuir, expandir ou deslocar suas áreas de distribuição geográfica para outros locais com condições apropriadas. Além disso, as espécies também podem responder com mudanças diretas e indiretas na sua fenologia, ou seja, quando indivíduos podem retardar ou antecipar seu período reprodutivo de acordo com as mudanças sazonais no clima.

Na Amazônia, o cenário de altas emissões de GEE (RCP8.5), mudanças climáticas combinadas com alto desmatamento, pode aumentar em mais de 100% a área com alta probabilidade de sofrer incêndios florestais, quando comparada ao período de 2013-2015; dobrar a área queimada até 2050, quando comparada a 2000; e aumentar entre 400-2.800% a área queimada até 2100, quando comparada ao período de 1990 a 2000. Projeções de aumento da intensidade do fogo indicam um aumento de 90% na perda de carbono por unidade de área queimada, quando comparada a 2010. Num cenário de emissões de GEE mais baixas e

desmatamento reduzido, o aumento de área florestal com alta probabilidade de incêndio poderá ser reduzido para um quinto, e o aumento da área queimada até 2100 será de 100-500%. Um aumento de 4°C na temperatura média global elevará o risco de incêndios florestais, contribuirá para a mortalidade potencial de árvores e para a conversão de partes extensivas de floresta amazônica em uma vegetação mais seca e de menor biomassa.

A conversão de florestas em pastagens ou a desestruturação do ecossistema florestal por questões climáticas em larga escala (ponto de não retorno) levaria a uma emissão massiva de carbono à atmosfera, com forte impacto no balanço global de carbono. O aumento de incêndios, de desmatamento e da seca, em função da retroalimentação floresta-atmosfera, eleva o risco de morte progressiva da floresta extensa e o potencial de mudança do bioma florestal amazônico para uma vegetação com características de savana. Além disso, a redução da cobertura vegetal após incêndios e eventos de mortalidade de árvores pode diminuir a infiltração de água, aumentar a erosão do solo, liberar sedimentos que degradam a qualidade da água potável e reduzir a recarga de águas subterrâneas e o fluxo de nascentes.

As savanas também estão sob alto risco dos impactos das mudanças climáticas combinadas com alterações de uso e cobertura do solo. O Cerrado brasileiro já possui aproximadamente 50% de sua área convertida para agropecuária. No Pantanal, poderá ocorrer aumento do déficit hídrico devido ao aumento das temperaturas e à redução das chuvas. Em toda a região central do Brasil, projeta-se o aumento das inundações fluviais e pluviais, da aridez e da velocidade média do vento, além da ocorrência de incêndios e secas.

Até 85% dos sistemas naturais (espécies de plantas e animais, habitats e comunidades) classificados como hotspots de biodiversidade na América Sul e América Central serão negativamente impactados

IMPACTOS PROJETADOS

incluem a contração ou perda da distribuição geográfica de espécies, perda da diversidade ou alta substituição de espécies. A Mata Atlântica é um bioma particularmente vulnerável a esses impactos. A região do SES é uma prioridade global para a conservação da biodiversidade e engloba dois hotspots de biodiversidade importantes: a Mata Atlântica e o Cerrado. Ambos os biomas são estudados mundialmente devido à associação entre os impactos das mudanças climáticas e a biodiversidade, especialmente para vertebrados terrestres, e 72% das espécies ameaçadas do Brasil encontram-se nesses biomas. Um crescente número de estudos mostra que esses biomas estão sob risco de perda de biodiversidade, principalmente devido a reduções da distribuição geográfica das espécies, projetadas para táxons diferentes. Segundo projeções, as mudanças climáticas irão impactar severamente o Cerrado, principalmente pela diminuição da distribuição geográfica de espécies de plantas. Na Mata Atlântica, o principal impacto se dará pela contração de distribuição de espécies endêmicas. As mudanças climáticas também poderão acarretar perda de área de outros habitats, como os manguezais, devido aos seus efeitos sobre o aumento do nível do mar. Embora os efeitos das mudanças climáticas na biodiversidade tenham sido investigados mais intensamente no Cerrado e na Mata Atlântica, modelos preditivos de extinção de espécies têm sugerido uma drástica perda de espécies na Amazônia, desde árvores até vertebrados terrestres.

pelas mudanças climáticas, e estudos focam principalmente na Mata Atlântica e no Cerrado. O risco adicional aos efeitos combinados entre mudanças climáticas e outros impactos sobre espécies (por exemplo, mudanças de uso do solo, caça excessiva, poluição e espécies invasoras) vem sendo levantado pelo IPCC desde seu 3º Relatório de Avaliação (AR3). Em geral, os *hotspots* terrestres que serão mais afetados pelo aquecimento global são aqueles que já estão sendo impactados pela perda de habitat devido à mudança de uso do solo.

Estudos focam principalmente em vertebrados e plantas da Mata Atlântica e Cerrado no Brasil, com uma grande lacuna de conhecimento para ecossistemas de água doce.

Estudos de modelagem projetam reduções na taxa de descarga hídrica de 27% nos rios da bacia do Tapajós e de 53% na bacia do Tocantins-Araguaia até o fim deste século, o que pode afetar a biodiversidade de água doce, a navegação e a geração de energia hidrelétrica. Por outro lado, estudos recentes apontaram um aumento de 26% na extensão de áreas inundadas na Amazônia desde 1980. Ainda que a fauna e a flora dos ecossistemas alagáveis sejam adaptadas às mudanças sazonais no regime de inundação, o aumento da frequência e da intensidade de eventos climáticos extremos pode alterar esses ambientes, mudando as condições adequadas para a sobrevivência de várias espécies altamente adaptadas e inclusive endêmicas de ambientes alagáveis.

A conexão climática entre as regiões do Pantanal e Amazônia e a influência do desmatamento na precipitação local têm implicações sobre a conservação de serviços ecossistêmicos e a segurança hídrica nesses biomas. Os impactos projetados das mudanças climáticas levarão a alterações profundas nas dinâmicas anuais de enchentes nas áreas alagadas do Pantanal, afetando severamente o funcionamento do ecossistema e a biodiversidade. Na Amazônia, espera-se um aumento na frequência e intensidade de eventos extremos, tanto de cheias quanto de secas. Desde 2009, a Amazônia já presenciou sete dos dez maiores eventos de cheia da região.

A expansão urbana também leva à perda e fragmentação de habitat na paisagem, com efeitos sobre os recursos florestais e o uso da terra. Por exemplo, na Amazônia brasileira, o crescimento urbano mais rápido ocorre dentro de cidades que estão localizadas nas proximidades de áreas rurais que produzem *commodities* (minerais ou culturas agrícolas e pecuária) e estão, em sua grande maioria, conectadas a corredores de exportação. Nessa região, a mineração aumentou significativamente a perda de florestas localizadas em até 70 km de distância dos limites das áreas de arrendamento de mineração, causando 11.670 km² de desmatamento entre 2005 e 2015, representando assim cerca de 9% de toda a perda de floresta amazônica durante esse período (Nabuurs et al., 2022).

5

O QUE PODEMOS FAZER AGORA?

Neste item, são apresentadas as alternativas e ações que já estão em curso ou que podem ser adotadas em curto e longo prazos, para lidar com os principais efeitos das mudanças do clima.

SEGUNDO O AR6 do IPCC, as emissões de GEE aumentaram em todos os principais setores desde o último relatório de avaliação (AR5). Destacou-se que reverter essa tendência exige que os tomadores de decisão nos governos, na sociedade civil e no setor privado priorizem ações de combate à mudança do clima. No caso do Brasil, algumas das principais ações de combate à mudança do clima são: a redução do desmatamento, investimentos em restauração de ecossistemas e conservação de áreas naturais, uma matriz energética diversificada e de baixo impacto socioambiental, o reaproveitamento e a reciclagem de materiais. Para que políticas ambientais e climáticas sejam efetivas, o país deve implementar estratégias de gestão do território que valorizem a regeneração de ecossistemas, paisagens multifuncionais, recuperação de áreas degradadas, entre outros.

O AR6 demonstra que todas as projeções que limitam o aquecimento global a 1,5°C dependem que as emissões de GEE reduzam em 43% até 2030, que não se invista em novas estruturas baseadas em combustíveis fósseis, que ocorram transformações rápidas em todos os setores para evitar impactos climáticos extremos, que aconteçam mudanças para comportamentos e estilos de vida mais sustentáveis e que haja aumento de subsídios para mitigação, precificação das emissões de carbono e adoção de regulamentações que levem à transição para modelos de baixo carbono.

CONTEXTO GERAL COM ENFOQUE NO BRASIL

No Brasil, será necessário resolver impasses de governança e arranjo institucional para desenvolver o arcabouço exigido para a promoção de projetos e ações de mitigação. As metas do Brasil precisam alcançar o limite de 1,5°C para corresponder com a proporção de redução de emissões que cabe ao país.

O AR6 indica que as pegadas de carbono variam entre países e dentro de cada país, e que há uma distribuição desigual dos efeitos provocados pela utilização dos recursos naturais, devido às diferenças nos níveis de desenvolvimento, estrutura econômica, ciclo econômico, infraestrutura pública, clima e estilos de vida residenciais (Dhakal *et al.*, 2022). No entanto, apesar das complexidades das interações que resultam em padrões de desenvolvimento, a história também mostra que as sociedades podem influenciar a direção das trajetórias de desenvolvimento com base em escolhas feitas por tomadores

de decisão, cidadãos, setor privado e outras partes interessadas (Dhakal *et al.*, 2022). Numa análise prospectiva, espera-se que as escolhas sobre a natureza das atividades econômicas tenham implicações significativas para as emissões. Por exemplo, uma trajetória de desenvolvimento que se concentra em melhorar o crescimento econômico com base na manufatura provavelmente levará a desafios muito diferentes para a mitigação, em comparação com uma que se concentre no crescimento liderado por serviços. A exemplo disso, as escolhas sobre a exploração ou não de petróleo offshore no Brasil terão implicações significativas para as emissões de GEE do país (Lecocq *et al.*, 2022), podendo contribuir negativamente ao balanço de carbono global. A transição energética, urgente, afastando os combustíveis fósseis e ricos em carbono não renovável deve ser um objetivo prioritário a ser alcançado.

Destaca-se o reconhecimento de que o Brasil mudou sua trajetória de desenvolvimento para reduzir as emissões e progredir em direção a vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), embora o progresso não seja linear. Nas últimas duas décadas, o país fez progressos notáveis na implementação de uma sequência de políticas em vários setores. Múltiplos objetivos vão desde a erradicação da pobreza até o fornecimento de acesso a energia, abordando a desigualdade, fornecendo educação, melhorando a saúde, limpando o ar e a água, melhorando a conectividade, sustentando o crescimento e proporcionando empregos, entre outros. Por exemplo, erradicar a pobreza e reduzir a desigualdade é uma prioridade de desenvolvimento em muitos países, como o Brasil, Indonésia, Índia, África do Sul e outros países de baixa e média renda (Lecocq *et al.*, 2022).

O avanço na redução de emissões no Brasil se deu essencialmente pela redução do desmatamento, em particular na Amazônia. Outras estratégias de mitigação podem depender da tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCS) no Brasil como em outros países (Lecocq *et al.*, 2022), embora a viabilidade econômica da implantação ainda não esteja clara. No âmbito da segurança energética, estudos recentes identificaram exemplos que apoiam transições energéticas rápidas. Um deles descreve cinco rápidas transições em escala nacional em tecnologias de uso final, que vão de iluminação na Suécia, fogões de cozinha na China, fogões a gás liquefeito de petróleo na Indonésia, veículos a etanol no Brasil e condicionadores de ar nos EUA. Para o setor de transportes, o IPCC evidencia que em economias emergentes, como Índia, Brasil, Turquia e África do Sul, uma alta parcela das emissões de

carbono relacionadas ao transporte está associada ao estilo de vida de famílias urbanas de renda média e alta (Dhakal *et al.*, 2022).

Segundo o AR6, as oportunidades de carros e bicicletas compartilhados estão mais avançadas no setor de mobilidade em países como o Brasil, embora haja barreiras tecnológicas para expandir esse serviço em regiões de menor renda. A princípio, o transporte coletivo, além de ser um serviço essencial, tem impacto direto na mobilidade, constitui um meio importante para reduzir a poluição ambiental, os congestionamentos e o uso de combustíveis fósseis, quando comparado à utilização de veículos automotores individuais. Investir na qualidade das calçadas também pode contribuir, tornando a caminhada um meio de deslocamento seguro e agradável. Enquanto isso, construir infraestruturas adequadas para o uso da bicicleta ainda é um dos principais desafios de mobilidade para as cidades em todo o mundo (Dhakal *et al.*, 2022).

Com relação aos assentamentos informais, melhorar a qualidade de vida de seus ocupantes, incluindo-os nos processos de desenvolvimento, planejamento e gestão das áreas urbanas, auxiliaria nas trajetórias de desenvolvimento de baixo carbono usando inovações localmente apropriadas. Exemplos de mitigação do setor informal incluem bancos digitais na África; mobilidade usando o transporte coletivo na Índia; produção de alimentos, fornecimento de refeições e redução do desperdício de alimentos na América Latina (por exemplo, cozinhas de sopa no Brasil e cozinhas comunitárias em Lima no Peru); reciclagem informal de materiais, aquecimento e arrefecimento de espaços e iluminação (Creutzig *et al.*, 2022).

5.1

CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO COMPATÍVEIS COM METAS DE LONGO PRAZO

Há modelos que projetam diferentes trajetórias dos setores de energia, segurança alimentar, agricultura e transportes, bem como dos fatores de risco associados relacionados com a mortalidade. Estudos destacados no relatório sugerem que seguir por um cenário sustentável poderia resultar em reduções anuais de 1,18 milhão de mortes associadas à poluição atmosférica, 5,86 milhões de mortes relacionadas à alimentação e 1,15 milhão de mortes devido à inatividade física (Riahi *et al.*, 2022).

Cenários de baixo carbono também estão disponíveis em modelos nacionais, tal como há para o Brasil, com uma boa representação do setor de transportes. Os cenários de baixo carbono são definidos em relação a um nível global de estabilização climática de, por exemplo, um aquecimento de 2°C/1,5°C, ou uma meta de redução de emissões de CO₂ mais rigorosa do que a que foi considerada nas NDCs, como as vias de emissões líquidas zero (Jaramillo et al., 2022).

Alguns dos cobenefícios para a saúde, bem-estar e equidade associados à ação climática derivam do investimento em infraestrutura básica: saneamento, água potável, energia limpa, dietas saudáveis acessíveis, transporte público limpo e melhoria da qualidade do ar a partir de soluções transformadoras em todos os setores econômicos, incluindo agricultura, energia, transporte e edifícios.

5.2 MITIGAÇÃO EM SETORES-CHAVE NO CURTO E MÉDIO PRAZO

ENERGIA

No Brasil, Índia e África do Sul, países onde a desigualdade social é extrema, os setores que dominam as necessidades totais de energia são a mobilidade (51-60%), a produção e preparação de alimentos (21-27%) e a habitação (5-12%) (Creutzig et al., 2022). O Brasil conta com diferentes fontes de energia economicamente viáveis em sua matriz energética e a grande participação de fontes renováveis na sua composição é uma de suas principais vantagens. A diversificação da matriz energética brasileira, por exemplo com o uso da cogeração por biomassa, pode contribuir para a segurança energética do país. A biomassa é vista como uma das alternativas para complementar a geração hidrelétrica.

Levando-se ainda em consideração os custos de produção de energia para o país, a geração de energia elétrica, atualmente dominada pela energia hidrelétrica, poderia chegar a 100% na otimização de custos com a adição de biomassa (Lecocq et al., 2022). A bioenergia pode representar até 40% do consumo total de energia final do Brasil e uma participação de 60% do combustível para veículos leves até 2030 (Lefèvre et al., 2018), e é considerada a mais econômica para os setores de transporte e indústria (Lecocq et al., 2022).

A TECNOLOGIA DE BIOENERGIA COM CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO (BECCS) no setor de energia também pode ser considerada uma opção econômica para a mitigação do lado da oferta. Já a tecnologia de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) vem sendo discutida e apresentada em muitos cenários de mitigação acelerada.

TRANSPORTES

No hemisfério Sul, a conversão do transporte público em transporte elétrico, especialmente ônibus municipais, como observado na cidade do Rio de Janeiro, pode se transformar num diferencial de mitigação importante, contribuindo ao mesmo tempo para reduzir os problemas crônicos de mobilidade urbana verificados nas grandes cidades brasileiras – por exemplo, e-trikes em Manila, Filipinas (Lwasa *et al.*, 2022). Incentivar esse tipo de iniciativa para que ganhe escala é essencial para atingir objetivos concretos de mitigação e mobilidade urbana.

No âmbito de metas para implementação de bioenergia, foram adotadas múltiplas políticas em nível nacional e supranacional para promover a utilização da bioenergia no setor dos transportes e para a produção de bioeletricidade. As políticas existentes obrigam ou subsidiam a produção e a utilização da bioenergia. Nos últimos anos, políticas foram propostas, postas em prática ou atualizadas em diversos países – no Brasil, destacam-se o RenovaBio e as ações previstas em sua Contribuição Nacionalmente Determinada.

EDIFICAÇÕES E INDÚSTRIA

Edifícios podem consumir 40% da energia primária e ser responsáveis por 30% das emissões de GEE relacionadas à energia, globalmente (MacNaughton *et al.*, 2018). Segundo a Organização Mundial da Saúde (2018), cerca de 4 milhões de mortes prematuras no mundo são atribuídas à poluição do ar, tanto em ambiente urbano como rural. Vários estudos monetizaram os benefícios para a saúde atribuídos à redução da poluição do ar resultantes da implementação de ações de mitigação em edificações. MacNaughton *et al.* (2018) estimaram US\$ 103,91 milhões (valor para 2016) em cobenefícios para a saúde, com uma economia de US\$ 251 milhões em energia, através de projetos certificados LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) no Brasil entre 2000 e 2016 (Cabeza *et al.*, 2022).

Atualmente, em diversos países, há em curso o desenvolvimento e a aplicação de rótulos de eficiência energética. O Brasil, por exemplo, possui selos obrigatórios para edifícios públicos. Os padrões de eficiência ajudarão os países em desenvolvimento a reduzir a demanda de pico de energia pela metade, reduzindo assim os grandes custos de investimento em novas redes de geração, transmissão e distribuição. Um bom exemplo dessas ações está associado à utilização/permute para os novos condicionadores de ar, que são economicamente eficientes e usam fluidos refrigerantes com menor potencial de aquecimento global. A adoção de condicionadores de ar está aumentando significativamente em países de baixa e média renda, à medida que o poder aquisitivo médio das populações aumenta e as temperaturas médias também (Lecocq *et al.*, 2022).

Desde o AR5 do IPCC, o interesse em políticas de economia circular aumentou (Bashmakov *et al.*, 2022). Entretanto, as implicações políticas de emissões zero para as indústrias pesadas têm sido, no geral, relativamente pouco exploradas, embora algumas análises nessa direção estejam disponíveis no AR6. Para a indústria brasileira, tem havido um foco de longa data em políticas de eficiência energética por meio de acordos voluntários e negociados, esquemas de gestão e auditoria de energia e vários programas voltados para a indústria. Essas estratégias podem ser eficientes não apenas no âmbito da produção no setor privado, mas também na economia dos processos produtivos.

ECOSISTEMAS E BIODIVERSIDADE

A restauração de paisagens terrestres pode ser um resultado direto dos caminhos de desenvolvimento resiliente ao clima propostos pelo IPCC, sendo fundamental para alcançar diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os de número 1, 2, 6, 8, 13 e 15, embora também apresente riscos de conflitos de escolha (*trade-offs*) entre si. A restauração da paisagem é quase sempre uma ação de mitigação e pode fornecer capacidade adaptativa. Apesar da política no Brasil tender a se concentrar na Amazônia como sumidouro de carbono, os cobenefícios de mitigação das ações de adaptação baseadas em diferentes ecossistemas têm sido destacados na literatura (Lecocq *et al.*, 2022).

Desde o início dos anos 2000, o Brasil implantou várias medidas regulatórias para conter o desmatamento, incluindo a aplicação de regulamentos sobre a mudança do uso da terra na área legal da Amazônia. A aplicação desses regulamentos, entre outras abordagens, é creditada por incentivar a redução em larga escala do desmatamento e das emissões de carbono associadas após 2004. Evidências empíricas demonstraram que as regulamentações reduziram o desmatamento no Brasil, mas, ao longo do tempo, o quadro se reverteu quando sua aplicação não era consistente (Nabuurs *et al.*, 2022).

A Lei de Proteção da Vegetação Nativa, ou Código Florestal, é considerada a principal lei ambiental do país, criada em 1934 e revisada em 2012. Essa lei regula o uso da terra e a conservação de vegetação nativa em propriedades privadas, determinando onde e quanto se pode desmatar, além de obrigar os proprietários a restaurar a vegetação em locais específicos, caso necessário. A implementação do Código Florestal nos níveis federal, estadual e municipal é uma medida-chave de mitigação da NDC brasileira (Henderson *et al.*, 2020). No entanto, a adesão à lei por parte dos proprietários ainda é baixa, principalmente em biomas não florestais, como a Caatinga (Niemeyer e Vale, 2022).

De acordo com o AR6, a maior parcela das reduções de emissões ou compensações de carbono na América Latina foi oriunda da desaceleração do desmatamento no Brasil, principalmente entre 2004 e 2012. Nesse caso, as estimativas foram feitas de acordo com metodologias bem estabelecidas para o país (Nabuurs *et al.*, 2022).

AGRICULTURA

Como parte da estratégia nacional, inúmeras práticas para reduzir as emissões de GEE da agricultura e, em particular, da indústria da agricultura animal, vêm sendo subsidiadas. Estimativas sugerem que essas práticas podem ter reduzido as emissões agrícolas em 169 MtCO₂ entre 2010 e 2020.

As tecnologias em rápido avanço moldam a produção e o consumo, impulsionando os padrões de uso da terra e os ecossistemas terrestres em várias escalas. Espera-se que inovações ajudem a impulsionar o aumento da produção agrícola global durante a próxima década (Nabuurs *et al.*, 2022), sendo assim menos necessário converter ecossistemas em áreas produtivas agrícolas. Por exemplo, as tecnologias emergentes de edição de genes podem avançar as capacidades de melhoramento de culturas. Essas mudanças tecnológicas foram significativas para a expansão da soja no Brasil, que foi adaptada a diferentes solos e fotoperíodos (Nabuurs *et al.*, 2022), embora também tenha levado à conversão de vegetação nativa.

Há evidências de que a Moratória da Soja da Amazônia, um esforço pelo qual os grandes consumidores da indústria concordaram voluntariamente em não comprar soja cultivada em terras desmatadas após 2008, contribuiu para a redução do desmatamento na Amazônia Legal. No entanto, estudos recentes mostraram que parte do desmatamento da Amazônia foi deslocada para a região do Cerrado, que é um hotspot global para a biodiversidade e tem estoques significativos de carbono (Nabuurs *et al.*, 2022). Nesse sentido, destaca-se que a expansão da Moratória da Soja (SoyM) da Amazônia brasileira para o Cerrado (savanas brasileiras) impediria a conversão direta de 3,6 Mha de vegetação nativa em soja, até 2050, e evitaria a emissão de 0,02 GtCO₂eq/ano (Lecocq *et al.*, 2022).

Inúmeros países em desenvolvimento estabeleceram esforços políticos para reduzir as emissões agrícolas ou aumentar o armazenamento de carbono. No Brasil, o Programa ABC, inaugurado em 2010 para promover o desenvolvimento sustentável na agricultura, contribuiu para reduzir as emissões de GEE entre 106,25 e 169,93 MtCO₂ de 2010 a 2018 (Henderson *et al.*, 2020). No entanto, os investimentos em agricultura de baixo carbono no Brasil somaram apenas 2% do total de recursos para a agricultura convencional em 2019.

Para além do carbono, sistemas mais biodiversos, como os agroflorestais, têm o potencial técnico de estocar 4.1 (0.3 – 9.4) GtCO₂eq/ano, globalmente, para o período de 2020 a 2050 (Nabuurs *et al.*, 2022). Sistemas agroflorestais combinam objetivos de mitigação e produção agrícola e contribuem para mitigação e adaptação às mudanças climáticas e com 12 dos 17 ODS (Parmesan *et al.*, 2022; Schipper *et al.*, 2022). Há também maiores benefícios para aves e espécies locais de árvores e menos para espécies exóticas de plantas. Na Mata Atlântica brasileira, agroflorestas têm até 45% mais biodiversidade e 65% mais serviços ecossistêmicos, quando comparados à produção de madeira e plantações convencionais, além de superar os lucros da pecuária (Parmesan *et al.*, 2022).

GOVERNANÇA E POLÍTICAS NACIONAIS E SUBNACIONAIS

Benefícios substanciais da ação climática podem resultar do investimento integrado em sistemas de transporte público, saúde, infraestrutura, água e saneamento, energia limpa, alimentos saudáveis a preços acessíveis, habitação, melhoria da qualidade do ar e proteção social (Dubash *et al.*, 2022).

Alguns países abordam as NDCs como uma oportunidade para integrar objetivos de mitigação e mudanças econômicas mais amplas ou transformações setoriais. Por exemplo, a NDC de 2016 do Brasil concentrou-se nas emissões da mudança do uso da terra, incluindo a intensificação agrícola e produção pecuária, para alinhar a mitigação com uma estratégia nacional de redução do desmatamento nos vários biomas brasileiros (Dubash *et al.*, 2022).

A estratificação de políticas públicas é uma abordagem comum quando as alterações climáticas estão integradas na consideração de múltiplos objetivos. Nesses casos, a governança climática tende a ser sobreposta a instituições setoriais para a busca de cobenefícios e/ou para sanar preocupações de desenvolvimento mais amplas. No Brasil, por exemplo, a abordagem de mitigação tem sido basicamente focada na política florestal setorial (Dubash *et al.*, 2022). O Código Florestal, como já discutido, é chave na mitigação por conservação e restauração de florestas, e sua implementação total e reforçada tem o potencial de contribuir com a redução das emissões em até 85 MtCO₂eq ao ano, sendo essencial para atingir as metas de redução de GEE até 2030 (Soterroni *et al.*, 2018).

As instituições podem criar espaços para acomodar preocupações de diversos atores. No Brasil, o Fórum Brasileiro sobre Mudanças Climáticas contempla um espaço para conciliar visões e abordagens aparentemente concorrentes para as mudanças climáticas (Dubash et al., 2022). Ao mesmo tempo, parece mais difícil obter apoio para novas iniciativas de governança climática em sistemas de governos federalistas, como no caso brasileiro, em que as regiões têm representação política nacional, embora os sistemas federais ofereçam a possibilidade de ação subnacional quando o acordo federal é limitado (Dubash et al., 2022).

A eficácia de uma combinação de políticas depende de condições que vão além das considerações de concessão e assenta também no contexto de governança mais vasto, em que ocorrem as transições setoriais, que podem incluir elementos facilitadores e incapacitantes. Os fatores facilitadores indicados no AR6 incluem um forte apoio político de alto nível, por exemplo, para abordar o desmatamento no Brasil, apesar dos poderosos interesses madeireiros e agrícolas.

COOPERAÇÃO INTERNACIONAL

O objetivo do Acordo de Paris é de fortalecer a resposta global à ameaça das mudanças climáticas no contexto do desenvolvimento sustentável e com esforços para erradicar a pobreza, contendo o aumento da temperatura média global muito abaixo de 2°C e com esforços para limitar o aumento para 1,5°C em relação ao período pré-industrial. O acordo leva em conta que o balanço entre emissões e remoções deve ser feito de forma igualitária entre os países. (Patt et al., 2022).

Isso sugere que nem todos os países devem atingir emissões líquidas zero de GEE ao mesmo tempo ou da mesma maneira. Se forem tomados cenários globais de 1,5°C e 2°C gerados pelos modelos de avaliação integrados, sem a aplicação de um princípio de equidade, os resultados indicam, por exemplo, que as emissões líquidas de GEE e CO₂ domésticas seriam alcançadas uma década antes da média global no Brasil e nos EUA e, posteriormente, na Índia e na Indonésia. Por outro lado, se os princípios de equidade forem levados em conta, espera-se que países como o Canadá e a União Europeia eliminem as emissões gradualmente mais cedo do que o indicado pelos cenários de custo ótimo e que países como a China e o Brasil possam eliminar gradualmente as emissões mais tarde, assim como outros países com emissões per capita mais baixas (Patt et al., 2022).

Os governos da Alemanha, Noruega e Reino Unido formaram uma parceria em 2014 para apoiar o financiamento baseado em resultados para REDD+, levando à adoção do Acordo de Paris. Nessa iniciativa, a Noruega se destacou como um dos maiores, se não o maior, doadores principais para REDD+, o que se materializou por meio de sua promessa em 2007 de prover aporte de recursos de aproximadamente US\$ 3 bilhões/ano. Deste montante, a Noruega prometeu US\$ 1 bilhão para o Brasil em 2008 e o mesmo montante para a Indonésia em 2010 (Patt *et al.*, 2022).

Tomemos como exemplo o setor da aviação civil. Iniciativas de REDD+ com abordagem jurisdicional também foram adotadas em vários mercados, como o Esquema de Compensação e Redução de Carbono para Aviação Internacional (Corsia, na sigla em inglês) (Patt *et al.*, 2022). No AR6 do IPCC consta a reflexão de que, no entanto, não está claro se o objetivo de crescimento neutro em carbono e maior redução das emissões de CO₂ no setor será suficientemente incentivado apenas por meio do uso de tais compensações, em combinação com os padrões, programas e planos de ação da Organização da Aviação Civil Internacional (Oaci), sem que medidas adicionais sejam tomadas – por exemplo, restrições à demanda. Se países como a China, o Brasil, a Índia e a Rússia não participarem nos requisitos de compensação voluntária do Corsia, isso poderá minar significativamente a sua capacidade de cumprir plenamente o objetivo setorial, limitando a cobertura do regime a menos de 50% das emissões de CO₂ da aviação internacional no período 2021-2026 (Patt *et al.*, 2022).

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, DESENVOLVIMENTO E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA

O IPCC destacou a importância de apoiar os países em desenvolvimento no fortalecimento de seus sistemas de inovação tecnológica e capacidades de inovação, a fim de acelerar a colaboração internacional. Existem estudos comparando as abordagens utilizadas nos leilões de energia renovável na África do Sul e na Dinamarca, encontrando um impacto positivo nos últimos estágios da inovação (principalmente implantação). Em uma outra análise mais ampla sobre leilões que abrangem países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), bem como Brasil, África do Sul e China, não foram encontrados impactos muito significativos na inovação tecnológica. Contudo, existem também estudos em que são comparados leilões de energia renovável em diferentes países da América do Sul, indicando que esses geralmente encontram

impactos positivos no que se refere à inovação tecnológica, o que é fundamental para o alcance das metas globais de redução de GEE (Blanco *et al.*, 2022), desde que respeitadas as salvaguardas socioambientais.

ACELERAÇÃO DA TRANSIÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

O AR6 destaca que a aceleração da transição para o desenvolvimento sustentável perpassa a expansão do uso de energia limpa, a promoção da transição energética a partir da substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, o incentivo às construções verdes, redesenhando as cidades, a transição para transportes de zero e baixa emissão de carbono, a conservação dos ecossistemas e a descarbonização da indústria.

Um dos estudos apresentados pelo IPCC identifica como principais barreiras, em relação às interações das partes interessadas, a disponibilidade de recursos, as tensões em curso entre as ambições de um elevado crescimento econômico e as próprias alterações climáticas já em curso. A inovação verde na indústria, por exemplo, depende criticamente das regulamentações. Nesse caso específico, Denton *et al.* (2022) avaliaram o papel das políticas fiscais na aplicação dos conhecimentos das ciências ecológicas na indústria brasileira com base em uma análise econométrica em todos os setores manufatureiros. Instrumentos como o financiamento a baixo custo para a inovação e o apoio a práticas sustentáveis podem promover a inovação verde de forma eficaz.

5.3 MEDIDAS DE ADAPTAÇÃO

As mudanças climáticas não são um conceito abstrato, mas um fato que afeta a vida no planeta, os ecossistemas, sua diversidade e funcionamento, os sistemas de produção da sociedade, entre vários outros impactos. Devemos reduzir as emissões e desacelerar o ritmo do aquecimento global. Mas é imperativo que busquemos medidas de adaptação às consequências decorrentes das mudanças climáticas e aos impactos previstos para o futuro. As consequências dependem do território, da estrutura social, da infraestrutura e da capacidade de absorver o impacto: a resiliência socioambiental.

Adaptação a um clima em mudança requer uma nova abordagem às pesquisas científicas, à governança e às ações da sociedade

civil, que devem ser impulsionadas por necessidades locais. Isso deve ser fundamentado por um processo orientado para a ação, que aproveite e contribua para o conhecimento tanto dos riscos das mudanças climáticas quanto das soluções tangíveis.

MANEJO DE ECOSISTEMAS

De acordo com o AR6, o Brasil teve um balanço positivo entre os demais países da América do Sul e América Central, em relação ao manejo adaptativo de ecossistemas (Nabuurs *et al.*, 2022). O país mostrou uma grande redução no desmatamento sem afetar a produção agrícola na Amazônia, conduzido sobretudo por políticas públicas. Suas políticas incluíram planejamento territorial (áreas protegidas, territórios indígenas e posse de terra), monitoramento por satélite, restrições de mercado e crédito para municípios com altos índices de desmatamento, além de incentivos para pequenos agricultores (Castellanos *et al.*, 2022). Essas políticas foram parcialmente financiadas pelo Fundo Amazônia desde 2012, porém, tal como mencionado anteriormente, houve um enfraquecimento de políticas e instituições ambientais no período 2015-2022 e o desmatamento da Amazônia voltou a crescer (Castellanos *et al.*, 2022). Essa tendência só foi invertida mais recentemente, em 2023, com a retomada das políticas de fiscalização e de preservação da floresta.

Incentivos econômicos para conservação, estratégia complementar e muitas vezes custo-efetiva, estão sendo cada vez mais implementados na região Amazônica. Isso inclui Pagamento por Serviço Ambiental (PSA), REDD+, certificados ambientais e facilidades para conservação. Porém essas ações ainda são controversas e mais pesquisas são necessárias sobre sua efetividade e possíveis efeitos secundários negativos (Castellanos *et al.*, 2022). Ademais, há um grande enfoque no bioma florestal amazônico e uma certa atenção para a Mata Atlântica e o Cerrado, mas outros biomas não florestais como Caatinga, Pampa e Pantanal recebem menos atenção e investimentos.

Uma medida pública de adaptação relevante para o contexto brasileiro é a proteção e restauração de áreas naturais, que são exemplos de Soluções Baseadas na Natureza (SbN). Soluções Baseadas na Natureza buscam proteção, manejo sustentável e restauração de ecossistemas, para tratar desafios sociais de forma efetiva e adaptativa, promovendo simultaneamente o bem-estar humano e benefícios para a biodiversidade (Cooley *et al.*, 2022). De fato, a restauração de ecossistemas é quase sempre uma ação de mitigação que pode também promover capacidade adaptativa (Lecocq *et al.*, 2022). Contudo, situações de pobreza e desigualdade reduzem a

capacidade humana de se adaptar às mudanças climáticas. Acesso limitado a recursos reduz as habilidades adaptativas e opções de respostas disponíveis. Portanto, embora conservação e restauração de ecossistemas sejam efetivas em reduzir riscos, essa efetividade depende da integração de soluções baseadas na natureza ao aumento das condições socioeconômicas locais (Castellanos *et al.*, 2022).

Adaptação baseada em Ecossistemas (AbE) é um tipo de SbN cujas estratégias focam no potencial dos ecossistemas em tamponar os efeitos negativos das mudanças climáticas, reduzindo vulnerabilidades e auxiliando na adaptação (Niemeyer & Vale, 2022). AbE reduz o risco climático entre setores, ao mesmo tempo promovendo cobenefícios sociais, econômicos, de saúde e ambientais (Pörtner *et al.*, 2022). AbE pode ser desenvolvida no âmbito de um conjunto de políticas públicas que fomentem o desenvolvimento sustentável. No Brasil, alguns estudos na temática apresentam um conjunto de políticas capazes de fomentar AbE, com foco no Semiárido brasileiro (Milhorance *et al.*, 2020), na Mata Atlântica, no Cerrado (Scarano, 2017) e na Caatinga (Niemeyer e Vale 2022). AbE está intimamente ligada a outros conceitos como serviços ecossistêmicos, capital natural e redução de riscos e desastres (Parmesan *et al.*, 2022).

O Código Florestal é uma política essencial para promover AbE no Brasil (Scarano, 2017; Niemeyer e Vale, 2022), tendo em vista o grande potencial do país para restauração, conservação e manejo sustentável da vegetação nativa em áreas privadas, uma vez que mais da metade da vegetação nativa do país está dentro dessas propriedades. Outros instrumentos incluem a conservação em áreas protegidas e o suporte à produção sustentável e à segurança hídrica e alimentar. Sistemas agrícolas climaticamente inteligentes e biodiversos, como os agroflorestais, oferecem grandes benefícios, tanto para mitigação como para adaptação por meio do aumento da segurança alimentar, fortalecimento das economias locais e aumento dos serviços ecossistêmicos, como estoque de carbono, regulação do clima e ciclo hidrológico, controle de pragas, pestes e doenças e manutenção da fertilidade do solo (Castellanos *et al.*, 2022). Reconhecer e incluir o conhecimento tradicional local, como as tecnologias sociais, na formulação de estratégias de adaptação é essencial para que as mesmas sejam justas (Niemeyer e Vale, 2022; Pörtner *et al.*, 2022).

O PAPEL DAS POPULAÇÕES INDÍGENAS E COMUNIDADES TRADICIONAIS

É necessário também destacar a importância do papel dos territórios indígenas, além das áreas protegidas, na conservação da vegetação

nativa, especialmente da floresta na Amazônia. Os territórios indígenas amazônicos e as áreas protegidas oferecem proteção para a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos. A contribuição de produtos florestais não madeireiros para a subsistência de comunidades locais, como castanha-do-pará, vime e açaí, está demonstrando ser uma estratégia promissora de colheita sustentável que pode reduzir a vulnerabilidade socioeconômica dessas populações (Ometto *et al.*, 2022). Contudo, o aumento de incêndios florestais dentro de áreas protegidas, em particular territórios de povos indígenas e comunidades tradicionais, é preocupante e apresenta desafios para o futuro dos sistemas socioecológicos únicos e ameaçados, assim como dos serviços ecossistêmicos que eles fornecem (Castellanos *et al.*, 2022). Mecanismos de governança apropriados, direitos de posse de terra e meios de subsistência devem ser garantidos a tais comunidades. Além disso, o direito de propriedade é fator crítico para aplicação de técnicas de manejo florestal sustentável, em especial para os povos indígenas (Ometto *et al.*, 2022).

O direito de posse de terra é um fator-chave para garantir a capacidade adaptativa no meio rural e em áreas indígenas, reduzindo conflitos por terra. Mas, para além dessas questões, muitos conflitos por água na América do Sul e América Central estão enraizados na governança desigual sobre o uso da água, que exclui usuários das decisões sobre sua alocação. Regimes hídricos inclusivos potencializam o planejamento de adaptação a longo prazo. Isso foi tratado em algumas estratégias nacionais brasileiras, como, por exemplo, no Semiárido, onde um modelo de governança sobre a água descentralizada e participativa, partindo de baixo para cima, foi induzida pela sociedade civil e instituições de pesquisa para fomentar tecnologias sociais de captação de água da chuva, reduzindo o risco e promovendo adaptação às secas (Castellanos *et al.*, 2022).

CIDADES

No Brasil é difícil pensar em políticas de adaptação às mudanças climáticas separadas de políticas urbanas (Castellanos *et al.*, 2022). A pobreza em áreas urbanas é geralmente associada a altos níveis de vulnerabilidade devido à informalidade, infraestrutura pobre e desigual, déficit de habitação e ocupação de áreas de risco (Dodman *et al.*, 2022; Castellanos *et al.*, 2022). Sendo assim, é necessário evitar a discriminação ética e a exclusão social, e o investimento governamental em infraestrutura (por exemplo, educação e saúde) para determinada parcela da sociedade pode diminuir a vulnerabilidade e aumentar a capacidade adaptativa das populações (Castellanos *et al.*, 2022).

Nas últimas duas décadas, o Brasil teve um grande progresso ao implementar uma sequência de políticas multisectoriais, aumentando

simultaneamente o salário mínimo para famílias de baixa renda, ao atingir o acesso universal à energia e ao aumentar a qualidade de vida e bem-estar da maior parte da população (Lecocq *et al.*, 2022).

No meio urbano, soluções baseadas na natureza podem diminuir a capacidade de transmissão de doenças infecciosas propagadas por vetores e pela água, como também os casos de malária, dengue, zika vírus e diarreia no Brasil. A conservação florestal atua também favorecendo o controle do ciclo hidrológico e da erosão do solo, melhorando a qualidade da água e reduzindo a incidência de doenças transmitidas por essa via. Tendo em vista que os principais serviços ambientais tendem a sofrer declínio em seus estoques e aumentar a sua distribuição socialmente desigual (IPBES, 2019), políticas de redução de desigualdade e pobreza em áreas urbanas devem agregar questões relacionadas à conservação e ao acesso aos serviços ambientais e à expansão urbana sobre esses serviços, como um vetor de agravamento dos impactos das mudanças climáticas. Bustamente *et al.* (2019) mencionam que as 197 unidades de conservação de uso sustentável nas regiões metropolitanas de Belo Horizonte, Belém, Rio de Janeiro e área do entorno de Brasília têm sido – e continuarão a ser até 2030 – altamente vulneráveis à expansão das manchas urbanas, comparadas às áreas de proteção integral.

Dentre as várias iniciativas de políticas de adaptação associando conservação de serviços ecossistêmicos a aumento de capacidade adaptativa via efeito de redução de desigualdade e pobreza, a agricultura urbana, com a ocupação de espaços urbanos, periurbanos e no entorno de grandes aglomerados urbanos, representa não apenas um maior volume de produção agrícola, como também potencial de inclusão socioeconômica e redução de pobreza, de melhorias nutricionais e de segurança alimentar e de complementação das redes e cadeias de abastecimento alimentar urbanas. Pode, ainda, atuar como um elemento dissuasivo da expansão da infraestrutura urbana e atividades econômicas que pressionam a biodiversidade e o estoque de capital natural responsável pela geração de serviços ambientais essenciais para a redução dos impactos climáticos nas cidades.

Além disso, sistemas de mobilidade e transporte têm um papel-chave na resiliência urbana (Dodman *et al.*, 2022). O Brasil foca tanto em mitigação como em adaptação nos sistemas de mobilidade e transporte. O planejamento urbano que combina transporte público acessível pode melhorar a qualidade do ar e contribuir para sociedades saudáveis e igualitárias e maior bem-estar para todos. Por outro lado, estimular a mobilidade ativa (caminhada e ciclismo) pode trazer benefícios para a saúde física e mental das pessoas. Os

espaços verdes urbanos contribuem para a adaptação e mitigação das mudanças climáticas e melhoram a saúde física, mental e o bem-estar.

Os apontamentos acima permitem pensar as políticas urbanas de adaptação às mudanças climáticas a partir de duas vertentes: a primeira se refere a *qual será a população que ocupará e consumirá o futuro espaço urbano*. Essa vertente enseja uma compreensão não apenas de quantitativos (total de população, grau de urbanização), mas principalmente os seus atributos (composição socioeconômica e demográfica, nível de capital humano, distribuição espacial intraurbana etc.). Assume-se que o nível de vulnerabilidade populacional aos extremos climáticos será contingente às heterogeneidades populacionais em dado território, e a forma futura que estas assumirão redefinirá as vulnerabilidades aos extremos climáticos (Barbieri et al., 2022; Barbieri; Pan, 2022). A segunda vertente refere-se a quais serão os *parâmetros urbanos morfológicos e de infraestrutura que guiarão as políticas de adaptação urbana*. Assume-se aqui que as vulnerabilidades populacionais futuras, definidas na primeira vertente, devem ser integradas a uma (des)construção e adaptação do espaço construído nas cidades em seus aspectos físicos (infraestrutura) e funcionalidade (oferta e acessibilidade de bens e serviços, inclusive serviços ecossistêmicos).

RISCOS E DESASTRES

No contexto da proteção social e ambiental, sistemas de monitoramento e alerta direcionados a eventos climáticos podem ser eficazes para a redução do risco de desastres, assim como programas de proteção social e gerenciamento de riscos à saúde e aos sistemas alimentares. Serviços de informação climática têm papel importante na adaptação climática, porém existe uma lacuna reconhecida entre a ciência climática e os agricultores. Logo, esses serviços devem enfrentar o desafio de garantir que as informações climáticas e serviços de assessoria sejam relevantes para as decisões de pequenos agricultores e agricultores familiares, provendo o acesso para comunidades rurais remotas e com infraestrutura marginal, a fim de garantir que agricultores possuam serviços climáticos e possam moldar seu *design* e entrega. Um exemplo é o serviço web AdaptaBrasil-MCTI, que prevê os riscos de impactos relacionados às mudanças climáticas sobre setores estratégicos, como segurança alimentar, energética e hídrica no Brasil (Castellanos et al., 2022).

SAÚDE

Os sistemas de saúde em geral não têm recursos humanos suficientes e capacitados para responder às mudanças climáticas. São necessárias ações que adéquem a infraestrutura dos sistemas de saúde para o enfrentamento a situações de emergência, como investimentos na capacitação de profissionais para trabalhar em condições de crises

emergenciais (epidemias, deslizamentos de terra, inundações, ondas de calor etc.). O país tem também que trabalhar nas condições estruturais de habitação, saneamento e oferta de água da população, tratamento de esgoto e coleta de lixo. Nesse contexto, observatórios do clima e saúde representam uma estratégia promissora para indicar áreas críticas e direcionar políticas de adaptação. Por exemplo, o Observatório Brasileiro do Clima e Saúde traz informações sobre Manaus, na Amazônia. No nível nacional, o Brasil criou um observatório de clima e saúde, desenvolvido pela Fiocruz, com informações disponíveis para vários indicadores de saúde sensíveis ao clima (Castellanos *et al.*, 2022).

Outras medidas de adaptação desenvolvidas e implementadas nas América do Sul e América Central são ferramentas de previsão de epidemias. Modelos de previsão baseados no clima foram desenvolvidos no Brasil para dengue e leishmaniose cutânea. Esses sistemas podem auxiliar no desenho de políticas em locais onde o problema não existe, mas pode emergir como consequência de mudanças climáticas e do aumento da frequência de eventos extremos do clima (Codeço *et al.*, 2016; Johansson *et al.*, 2019).

Apesar dos avanços, poucas ferramentas se tornaram operacionais e amplamente utilizadas no processo de tomada de decisão. Ainda assim, o Brasil foi capaz de operacionalizar sistemas de alerta precoce na vigilância da dengue. Um exemplo é a previsão de risco de dengue baseada no clima, produzida anteriormente à Copa do Mundo de 2014, para informar sobre intervenções preventivas contra a doença (Castellanos *et al.*, 2022).

A redução dos impactos das mudanças climáticas na saúde perpassa o fortalecimento do Sistema Único de Saúde (SUS) e, principalmente, a construção de políticas e planejamento integrado com outros setores que atuam no processo de determinação social e ambiental da saúde. Assim, políticas voltadas para a preservação da biodiversidade e dos recursos naturais, bem como acesso ao saneamento básico, construção de moradias adequadas e acesso à renda básica, são políticas estratégicas para a redução dos riscos e impactos das mudanças climáticas. Além disso, é necessário o fortalecimento das ações de vigilância em saúde que visem o uso de modelos preditivos capazes de integrar dados epidemiológicos e dados socioambientais, para que possam construir de forma interdisciplinar estratégias de enfrentamento às mudanças climáticas e ambientais globais.

AGRICULTURA

Apesar de existir certo sentimento que o componente de adaptação tem recebido menor atenção que o componente de mitigação, na agropecuária brasileira existem diversas iniciativas, técnicas, práticas e sistemas que já são adotados ou estão sendo estudados visando à

adaptação dos sistemas agropecuários às mudanças climáticas. Por exemplo, o sistema de plantio direto, sistemas de rotação ou consorciação de culturas, sistemas integrados, principalmente aqueles que possuem componente florestal (integração lavoura-pecuária-floresta, integração pecuária-floresta, sistemas agrosilvipastoris etc.), e mesmo pastagens bem manejadas. Esses sistemas agropecuários ajudam a adaptação através de diversos mecanismos, tais como aumento da retenção de água no solo, redução da evapotranspiração e da variação de temperatura do solo, aumento do teor de matéria orgânica como consequência da fertilidade e saúde do solo e redução da temperatura ambiente para os animais.

Entretanto, o Portfólio de Mudança do Clima da Embrapa (Pellegrino et al., 2022), pontuou de forma muito assertiva uma série de exemplos de aspectos que ainda podem evoluir e contribuir para o processo de adaptação. Nesse sentido, pode-se destacar: os zoneamentos climáticos para diferentes cultivos e o mapeamento de áreas vulneráveis e prioritárias à intervenção; identificação de espécies resistentes aos impactos bióticos; indicadores e métodos de baixo custo para quantificação, monitoramento e valoração dos impactos das mudanças climáticas no solo e na água; fortalecimento de mecanismos econômico-financeiros de incentivo ao manejo sustentável do solo e da água no meio rural; desenvolvimento de sistemas de alerta; plataformas interativas para acompanhamento pelo produtor das condições meteorológicas e seu impacto na produção agropecuária; apoio à elaboração e implementação de políticas de combate à desertificação e degradação do solo e da água no meio rural; e ênfase nos estudos da biodiversidade e sua contribuição para a resiliência dos sistemas produtivos. Em relação à produção animal, medidas de adaptação devem envolver modificações nos sistemas de manejo, nutrição e estratégias de cruzamentos, demandando avanços tecnológicos para a tomada de decisão pelos produtores. Uma gradual redução da criação extensiva, por meio de uma intensificação sustentável dos sistemas de produção animal, acompanhada da utilização de sistemas integrados que sequestram carbono e melhoram o microclima para os rebanhos (Pellegrino et al., 2022).

Fica evidente, portanto, que o componente de adaptação na agropecuária tem avançado, mesmo que de forma muito associada a práticas e sistemas que têm como foco principal a mitigação. Porém ainda existem grandes desafios que, para serem vencidos, demandarão o alinhamento entre as iniciativas de desenvolvimento tecnológico, políticas públicas e planejamento estratégico que permita efetivamente mitigar os impactos presentes e futuros das mudanças do clima.

Estratégias de adaptação para outros setores, como energia, estão tratados ao longo do texto



CONSIDERAÇÕES FINAIS

DIANTE DA CONSTATAÇÃO dos vários relatórios do IPCC, reforçada no AR6, da evidência de que o aquecimento médio do planeta tem relação com as atividades humanas, faz-se necessária e urgente a implementação de ações efetivas que assegurem a redução das emissões de GEE ainda nesta década. Para que a mitigação das mudanças do clima seja possível, é necessário manter o limite de 1,5°C para o aumento médio da temperatura da atmosfera terrestre. Entretanto, as emissões continuam aumentando globalmente, e as metas brasileiras não têm correspondido ao tamanho da redução das emissões que cabem ao país. As emissões de GEE precisam parar de crescer em 2025, com ou sem excedente climático. Portanto, serão necessários um amplo planejamento e a promoção de projetos que levem à implementação de ações de mitigação e adaptação em diversas escalas. Segundo o AR6, para limitar o aquecimento global é necessário ampliar os investimentos em mitigação, aumentando os subsídios e criando o ambiente seguro de que o setor privado precisa para aumentar os investimentos em processos menos intensivos em carbono, repensar as cadeias de produção, considerando a redução das emissões de GEE como centrais, e incorporar, efetivamente, métricas socioambientais de sustentabilidade nos diversos setores da economia. As necessárias transformações passam pela amplificação do uso de energia limpa e de baixo carbono, pelo aumento da eficiência que assegure menor consumo de energia, pela inovação tecnológica na descarbonização industrial e transporte de baixas emissões e coletivos, pelo resgate da conexão com a natureza e pelo estímulo às construções verdes e conservação das paisagens naturais que podem apoiar os meios de subsistência e fortalecer a segurança alimentar.

Associado a isso, é preciso ampliar e implementar imediatamente medidas efetivas e viáveis para adaptação à mudança do clima. As soluções viáveis existem, mas é necessária a implementação de estratégias públicas e financiamento para que as alternativas se tornem boas práticas e cheguem às comunidades vulneráveis. Contudo, sabe-se que o financiamento climático para medidas de adaptação ainda representa uma parcela muito pequena dos recursos destinados. O GT2 do IPCC contribuiu no AR6 com a análise de viabilidade, eficácia e potencial de diversas medidas de adaptação para gerar cobenefícios e resultados na saúde das comunidades vulneráveis ou a redução da pobreza. Algumas abordagens de adaptação foram avaliadas no documento: a primeira delas trata da governança efetiva e da reconfiguração de programas sociais que incluem a adaptação climática e, por fim, podem diminuir a vulnerabilidade de comunidades vulneráveis a uma série de riscos. A segunda abordagem se refere à adaptação baseada no ecossistema, que envolve desde a proteção, restauração

e manejo sustentável de ecossistemas até as práticas agrícolas mais sustentáveis. As medidas de adaptação baseadas nos ecossistemas podem reduzir riscos climáticos como secas, calor extremo, inundações e incêndios. Eles também oferecem meios de subsistência, garantindo a segurança alimentar para as comunidades vulneráveis. Por fim, a terceira abordagem trata da combinação entre as soluções baseadas na natureza com as novas tecnologias e infraestrutura.

Segundo consta no AR6, o acesso a novas tecnologias e infraestrutura pode reduzir os riscos e ajudar a fortalecer a resiliência. O relatório destaca que são necessários o fortalecimento e a reconfiguração de circunstâncias políticas, econômicas e sociais que considerem as vulnerabilidades socioambientais relacionadas ao clima como elementos centrais à construção de trajetórias resilientes e sustentáveis às mudanças no clima.

REFE- RÊNCIAS

A

Alcântara E., J.A. Marengo, J. Mantovani, L.R. Londe, R.L.Y. San, E. Park, Y.N. Lin, J. Wang, T. Mendes, A.P. Cunha, L. Pampuch, M. Seluchi, S. Simões, L.A. Cuartas, D. Goncalves, K. Massi, R. Alvalá, O. Moraes, C.S. Filho, R. Mendes, C. Nobre. Deadly disasters in southeastern South America: Flash floods and landslides of February 2022 in Petrópolis, Rio de Janeiro, Natural Hazards and Earth System Sciences 23 (2023) 1157–1175. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1157-2023>. Acesso em set. 2024.

Alvala, R. C. S.; Barbieri, A. F. Desastres Naturais. In: NOBRE, C.A.; MARENGO, J.A. (eds.) Mudanças climáticas em rede: um olhar interdisciplinar. São José dos Campos, SP: INPE, 2017, cap. 7, p. 203-230.

Anderson, L.O., et al., 2018: Vulnerability of Amazonian forests to repeated droughts. Philos. Trans. Royal Soc. B Biol. Sci., 373(1760), 20170411. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2017.0411>. Acesso em set. 2024.

Araujo, R.V., et al., 2015: São Paulo urban heat islands have a higher incidence of dengue than other urban areas. Braz. J. Infect. Dis., 19, 146–155. doi:10.1016/j.bjid.2014.10.004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjid/a/dBxTPJ9XFJygW6rgLj8zMmR/?lang=en>. Acesso em set 2024.

Ayan S. Fleischmann et al., 2023 Environ. Res. Lett. 18 034024

B

Barbieri, A. F., E. Domingues, B. Queiroz, R. Ruiz, J. I. Rigotti, J.A. Carvalho and M. F. Resende. Climate change and population migration in Brazil’s Northeast: scenarios for 2025–2050. Population and Environment 31: 344-370. 2010.

Barbieri, A.F.; Pan, W.K. Population Dynamics and the Environment: the Democlimatic Transition.;In MAY, J.; GOLDSTEIN, J. International Handbook of Population Policy. New York: Springer, 2022, cap.6, p.109-130.

Barbieri, A.F.; Viana, R.M.; Soares, V.C.; Schneider, R.A. Contribuições teóricas para uma demografia dos desastres no Brasil. Revista Brasileira de Estudos de População [S. l.], v. 39, p. 1–29, 2022.

Bashmakov, I.A., L.J. Nilsson, A. Acquaye, C. Bataille, J.M. Cullen, S. de la Rue du Can, M. Fischedick, Y. Geng, K. Tanaka, 2022: Industry. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S.

Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.013. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Citation.pdf. Acesso em set. 2024.

Birkmann, J., E. Liwenga, R. Pandey, E. Boyd, R. Djalante, F. Gemenne, W. Leal Filho, P.F. Pinho, L. Stringer, and D. Wrathall, 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 [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1171–1274, doi:10.1017/9781009325844.010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/362431847_Poverty_Livelihoods_and_Sustainable_Development_Climate_Change_2022_Impacts_Adaptation_and_Vulnerability_Contribution_of_Working_Group_II_to_the_Sixth_Assessment_Report_of_the_Intergovernmental_Panel_. Acesso em set. 2024.

Blanco, G., H. de Coninck, L. Agbemabiese, E. H. Mbeye Diagne, L. Diaz Anadon, Y. S. Lim, W.A. Pengue, A.D. Sagar, T. Sugiyama, K. Tanaka, E. Verdolini, J. Witajewski-Baltvilks, 2022: Innovation, technology development and transfer. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.018. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Citation.pdf. Acesso em set. 2024.

Brasil, M. C. T. I. . Fourth national communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 2020.

Brito, K., Balmas, M., Chantre, C., & Rosental, R. Impactos das mudanças climáticas no setor elétrico: O papel da geração distribuída e do armazenamento de energia. 2022.

Brito, S. S. B.; Cunha, A. P. M. A.; Cunningham, C. C.; Alvalá, R. C. S.; Marengo, J. A.; Araujo Carvalho, M. Frequency, duration and severity of drought in the Brazilian Semi-arid region. *International Journal of Climatology*. V. 23, p. 200-213, 2017. DOI:10.1002/joc.5225. Vol 38(2): 517-529, Fev. 2018. <https://doi.org/10.1002/joc.5225>

Bustamante, M. et al. (Org.) 1º Diagnóstico Brasileiro de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos. São Carlos, SP: Editora Cubo, v. 1. 2019.

Cabeza, L. F., Q. Bai, P. Bertoldi, J.M. Kihila, A.F.P. Lucena, É. Mata, S. Mirasgedis, A. Novikova, Y. Saheb, 2022: Buildings. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.011. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Citation.pdf. Acesso em: set. 2024.

C

Canadell, J.G., P.M.S. Monteiro, M.H. Costa, L. Cotrim da Cunha, P.M. Cox, A.V. Eliseev, S. Henson, M. Ishii, S. Jaccard, C. Koven, A. Lohila, P.K. Patra, S. Piao, J. Rogelj, S. Syampungani, S. Zaehle, and K. Zickfeld, 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., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 673–816, doi: 10.1017/9781009157896.007. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter05.pdf. Acesso em: set. 2024.

Castellanos, E., M.F. Lemos, L. Astigarraga, N. Chacón, N. Cuvi, C. Huggel, L. Miranda, M. Moncassim Vale, J.P. Ometto, P.L. Peri, J.C. Postigo, L. Ramajo, L. Roco, and M. Rusticucci, 2022: Central and South America. 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 [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska,

K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Loschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1689–1816, doi:10.1017/9781009325844.014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Citation.pdf. Acesso em set. 2024.

Cissé, G., R. McLeaman, H. Adams, P. Aldunce, K. Bowen, D. Campbell-Lendrum, S. Clayton, K.L. Ebi, J. Hess, C. Huang, Q. Liu, G. McGregor, J. Semenza, and M.C. Tirado, 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 [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Loschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1041–1170, doi:10.1017/9781009325844.009. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Chapter07.pdf. Acesso em set. 2024.

Clarke, L., Y.-M. Wei, A. De La Vega Navarro, A. Garg, A.N. Hahmann, S. Khennas, I.M.L. Azevedo, A. Löschel, A.K. Singh, L. Steg, G. Strbac, K. Wada, 2022: Energy Systems. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.008. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Citation.pdf. Acesso em set. 2024.

Cooley, S., D. Schoeman, L. Bopp, P. Boyd, S. Donner, D.Y. Ghebrehiwet, S.-I. Ito, W. Kiessling, P. Martinetto, E. Ojea, M.-F. Racault, B. Rost, and M. Skern-Mauritzen, 2022: Oceans and Coastal Ecosystems and Their Services. 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 [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Loschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 379–550, doi:10.1017/9781009325844.005. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Chapter03.pdf. Acesso em set. 2024.

CRED - EM-DAT, 2022 Disasters in numbers, 2023.

Creutzig, F., J. Roy, P. Devine-Wright, J. Díaz-José, F.W. Geels, A. Grubler, N. Maïzi, E. Masanet, Y. Mulugetta, C.D. Onyige, P.E. Perkins, A. Sanches-Pereira, E.U. Weber, 2022: Demand, services and social aspects of mitigation. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.007. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Citation.pdf. Acesso em set. 2024.

Cunha, A. P. M. A.; Alvalá, R. C. S.; Cuartas, L. A.; Marengo, J. A.; Marchezini, Victor; Saito, Silvia Midori; Aguilar Muñoz, V.; Leal, K. R. D.; Ribeiro Neto, G. G.; Seluchi, Marcelo E.; Zeri, L. M. M.; Cunningham, C.; Costa, L. C. O.; Zhang, R.; Moraes, Osvaldo L.L. Brazilian experience on the development of drought monitoring and impact assessment systems. In: UNDRR. (Org.). Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (GAR 2019). 1ed. Genebra: UNDRR, 2019, v. , p. 1-30. (Capítulo de Livro). Contributing Paper to GAR 2019.

Cunha, A. P. M. A.; Brito, S. S. B.; Ribeiro Neto, G. G.; Alvalá, R. C. S. As secas de 1963-2017 no Distrito Federal. Anuário do Instituto de Geociências-UFRJ, Vol. 41-2, 2018, p. 487-498, ISSN 0101-9759 e-ISSN 1982-3908

Cunha, A. P. M. A.; Zeri, L. M. M.; Deusdará Leal, K.; Costa, L. Cuartas, L. A.; Marengo, J. A.; Tomasella, J.; Vieira, R. M. S. P.; Barbosa, A. A.; Castro, C. C.; Garcia, J. V. C.; Broedel, E.; Alvalá, R. C. S.; Ribeiro-Neto, G. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere* 2019, v. 10, p. 642; doi:10.3390/atmos10110642. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/10/11/642>. Acesso em set. 2024

Cunha, Ana Paula M. A.; Tomasella, Javier ; Ribeiro-Neto, Germano G. ; Brown, Matthew ; Garcia, Samia R. ; Brito, Sheila B. ; Carvalho, Magog A. . Changes in the spatial-temporal patterns of droughts in the Brazilian Northeast. *Atmospheric Science Letters* , v. 19, p. e855, 2018.

da Conceição Pôjo, B. C., & Moura, P. M. S. (2021). Usinas hidrelétricas da amazônia: adaptando o setor de energia para a segurança energética. *Revista Brasileira de Energia* Vol, 27(4). doi: 10.47168/rbe.v27i4.615. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356777118_Usinas_hidreletricas_da_Amazonia_adaptando_o_setor_de_energia_para_a_seguranca_energetica. Acesso em set. 2024.

D

de Abreu, V. H. S., Santos, A. S., & Monteiro, T. G. M. Climate change impacts on the road transport infrastructure: A systematic review on adaptation measures. *Sustainability*, 14(14), 8864. 2022.

de Souza Hacon, S., B.F.A. de Oliveira and I. Silveira, 2019: A review of the health sector impacts of 4°C or more temperature rise. In: Climate Change Risks in Brazil [Nobre, C.A., J.A. Marengo and W.R. Soares(eds.)]. Springer International Publishing, Cham, pp. 67–129. ISBN 978-3319928814.

de Souza, Daiane Batista et al. Utilização de dados censitários para a análise de população em áreas de risco. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 64, n. 1, p. 122-135, 2019.

Denton, F., K. Halsnæs, K. Akimoto, S. Burch, C. Diaz Morejon, F. Farias, J. Jupesta, A. Shareef, P. Schweizer-Ries, F. Teng, E. Zusman, 2022: Accelerating the transition in the context of sustainable development. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.019. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2022-mitigation-of-climate-change/accelerating-the-transition-in-the-context-of-sustainable-development/7615E85A0F5C76502E32F99B6635982C>. Acesso em set. 2024.

Dhakal, S., J.C. Minx, F.L. Toth, A. Abdel-Aziz, M.J. Figueroa Meza, K. Hubacek, I.G.C. Jonckheere, Yong-Gun Kim, G.F. Nemet, S. Pachauri, X.C. Tan, T. Wiedmann, 2022: Emissions Trends and Drivers. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.004. Disponível em: <https://research.birmingham.ac.uk/en/publications/emissions-trends-and-drivers>. Acesso em set. 2024.

Dian, S. et al., 2019: Integrating Wildfires Propagation Prediction Into Early Warning of Electrical Transmission Line Outages. *IEEE Access*, 7, 27586–27603, doi:10.1109/ACCESS.2019.2894141. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8620983>. Acesso em set. 2024.

Dias, M. C. A.; Saito, S. M.; Alvalá, R. C. S.; Seluchi, M.; Bernardes, T.; Camarinha, P. I. M.; Stenner, C.; Nobre, C. Vulnerability Index Related to Populations at Risk for Landslides in the Brazilian Early Warning System (BEWS). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, June 21, 2020. IJDRR_2020_73. Volume 49, October 2020, 101742. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101742>. Acesso em set. 2024. Dias, M. C. A.; Saito, S. M.; Alvalá, R. C. S.; Stenner, C.; Pinho, G.; Nobre, C. A.; Fonseca, M. R. S.; Santos, C.; Amadeu, P.; Silva, D.; Lima, C. O.; Ribeiro, J.; Nascimento, F.; Corrêa, C. O. Estimation of exposed population to landslides and floods risk areas in Brazil, on an intra-urban scale. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, June, 31 (2018) 449–459, 2018.

Dodman, D., B. Hayward, M. Pelling, V. Castan Broto, W. Chow, E. Chu, R. Dawson, L. Khirfan, T. McPhearson, A. Prakash, Y. Zheng, and G. Zier vogel, 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* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 907–1040, doi:10.1017/9781009325844.008. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Chapter06.pdf. Acesso em set. 2024.

Douville, H., K. Raghavan, J. Renwick, R.P. Allan, P.A. Arias, M. Barlow, R. Cerezo-Mota, A. Cherchi, T.Y. Gan, J. Gergis, D. Jiang, A. Khan, W. Pokam Mba, D. Rosenfeld, J. Tierney, and O. Zolina, 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., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1055–1210, doi: 10.1017/9781009157896.010. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter08.pdf. Acesso em set. 2024.

Dubash, N.K., C. Mitchell, E.L. Boasson, M.J. Borbor-Cordova, S. Fifita, E. Haites, M. Jaccard, F. Jotzo, S. Naidoo, P. Romero-Lankao, M. Shlapak, W. Shen, L. Wu, 2022: National and sub-national policies and institutions. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.015. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2022-mitigation-of-climate-change/national-and-subnational-policies-and-institutions/697781D3EBF6AEC870E6C1E5A2B54DF3>. Acesso em set. 2024.

E

Entriken, R. and R. Lordan. Impacts of extreme events on transmission and distribution systems. 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, IEEE, San Diego, USA, 1–10, 2012.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2022: Ano base 2021, Relatório Síntese. Rio de Janeiro, 2021.

Fernandes, Valesca Rodriguez; Cunha, Ana Paula Martins do Amaral, Cuartas Pineda, Luz Adriana; Leal, Karinne R. Deusdará; Costa, Lidiane C.O.; Broedel, Elisangela; França, Daniela de Azeredo; Alvalá, Regina Célia dos Santos; Seluchi, Marcelo E.; Marengo, Jose. Secas e os Impactos na Região Sul do Brasil. Revista Brasileira de Climatologia, Ano 17 – Vol. 28 – JAN/JUN 2021, páginas 561-584. ISSN: 2237-8642 (Eletrônica), DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v28i0.74717>

F

Fox-Kemper, B., H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slangen, and Y. Yu, 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., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1211–1362, doi: 10.1017/9781009157896.011. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2021-the-physical-science-basis/ocean-cryosphere-and-sea-level-change/F61263910A16BD9FDE86921E85E1E4D5>. Acesso em set. 2024.

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., et all (2023). Global Carbon Budget 2023, *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 5301–5369, <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>. Disponível em: <https://essd.copernicus.org/articles/15/5301/2023/>. Acesso em set. 2024.

G

Gestão da crise hídrica 2016-2018 : experiências do Distrito Federal / Editado por Jorge Enoch Furquim Werneck Lima... [et al.] - Brasília, DF : Adasa : Caesb : Seagri : Emater, DF, 2018.

Gulev, S.K., P.W. Thorne, J. Ahn, F.J. Dentener, C.M. Domingues, S. Gerland, D. Gong, D.S. Kaufman, H.C. Nnamchi, J. Quaas, J.A. Rivera, S. Sathyendranath, S.L. Smith, B. Trewin, K. von Schuckmann, and R.S. Vose, 2021: Changing State of the Climate System. 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., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 287–422, doi: 10.1017/9781009157896.004. Disponível em: <https://data.globalchange.gov/report/ipcc-ar6-wg1/chapter/ipcc-ar6-wg1-chapter02>. Acesso em set. 2024.

H

Henderson, B., C. Frezal, and E. Flynn, 2020: A survey of GHG mitigation policies for the agriculture, forestry and other land use sector. OECD Publishing, Paris, France, 88 pp. Nabuurs, G.-J., R. Mrabet, A. Abu Hatab, M. Bustamante, H. Clark, P. Havlík, J. House, C. Mbow, K.N. Ninan, A. Popp, S. Roe, B. Sohngen, S. Towprayoon, 2022: Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU). In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.009. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2022-mitigation-of-climate-change/agriculture-forestry-and-other-land-uses-afolu/465B45B2DF3F9DF46468F1445DBBE985>. Acesso em set. 2024.

IAB, Instituto Acende Brasil. O observatório do setor elétrico brasileiro. Ed. 25, 2021. Disponível em: https://acendebrasil.com.br/wp-content/uploads/2021/03/WP25_FINAL-WEB.pdf. Acesso em set. 2024.

IBGE. Caminhos para uma melhor idade. Retratos (A Revista do IBGE), n. 16, p. 18-25, fevereiro, 2019.

IBGE. Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 2020.

IPBES. Global assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. 2019. Disponível em: UN-IPBES, <https://ipbes.net/>. Acesso em set. 2024.

IPCC 2019: Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

IPCC-SYR-SPM, 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. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em set. 2024.

IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-35. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157964.001>. Acesso em set. 2024.

IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. 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 [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-33, doi:10.1017/9781009325844.001.

Strassburg, B. B. N., Brooks, T., Feltran-Barbieri, R., Iribarrem, A., Crouzeilles, R., Loyola, R., ... Balmford, A. (2017). Moment of truth for the Cerrado hotspot. *Nature Ecology & Evolution*, 1(4), 0099. doi:10.1038/s41559-017-0099. Disponível em: https://scholar.google.com.br/scholar?q=doi:10.1038/s41559-017-0099&hl=en&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart. Acesso em set. 2024.

IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-97892916916. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf. Acesso em set. 2024.

J

Jaramillo, P., S. Kahn Ribeiro, P. Newman, S. Dhar, O.E. Diemuodeke, T. Kajino, D.S. Lee, S.B. Nugroho, X. Ou, A. Hammer Strømman, J. Whitehead, 2022: Transport. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.012. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Citation.pdf. Acesso em set. 2024.

K

Kreibiehl, S., T. Yong Jung, S. Battiston, P. E. Carvajal, C. Clapp, D. Dasgupta, N. Dube, R. Jachnik, K. Morita, N. Samargandi, M. Williams, 2022: Investment and finance. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.017. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2022-mitigation-of-climate-change/investment-and-finance/2B2D215AC75ABFD679CE6C16CEB8A99F>. Acesso em set. 2024.

L

Lecocq, F., H. Winkler, J.P. Daka, S. Fu, J.S. Gerber, S. Kartha, V. Krey, H. Lofgren, T. Masui, R. Mathur, J. Portugal-Pereira, B. K. Sovacool, M. V. Vilariño, N. Zhou, 2022: Mitigation and development pathways in the near- to mid-term. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.006. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2022-mitigation-of-climate-change/mitigation-and-development-pathways-in-the-near-to-midterm/4BEF108BFD75E8A854C82AF0B2EBC30F>. Acesso em set. 2024.

Lecocq, F., H. Winkler, J.P. Daka, S. Fu, J.S. Gerber, S. Kartha, V. Krey, H. Lofgren, T. Masui, R. Mathur, J. Portugal-Pereira, B. K. Sovacool, M. V. Vilariño, N. Zhou, 2022: Mitigation and development pathways in the near to mid-term. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.006. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2022-mitigation-of-climate-change/mitigation-and-development-pathways-in-the-near-to-midterm/4BEF108BFD75E8A854C82AF0B2EBC30F>. Acesso em set. 2024.

Lee, J.-Y., J. Marotzke, G. Bala, L. Cao, S. Corti, J.P. Dunne, F. Engelbrecht, E. Fischer, J.C. Fyfe, C. Jones, A. Maycock, J. Mutemi, O. Ndiaye, S. Panickal, and T. Zhou, 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., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 553–672, doi: 10.1017/9781009157896.006. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter04.pdf. Acesso em set. 2024.

Lwasa, S., K.C. Seto, X. Bai, H. Blanco, K.R. Gurney, Ş. Kilkış, O. Lucon, J. Murakami, J. Pan, A. Sharifi, Y. Yamagata, 2022: Urban systems and other settlements. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.010. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2022-mitigation-of-climate-change/urban-systems-and-other-settlements/F8AEF956B904563A76D7330DCB1D0D1C>. Acesso em set. 2024.

M

Marengo, J.A., E. Alcantara, A.P. Cunha, M. Seluchi, C.A. Nobre, G. Dolif, D. Goncalves, M. Assis Dias, L.A. Cuartas, F. Bender, A.M. Ramos, J.R. Mantovani, R.C. Alvalá, O.L. Moraes, Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness, *Weather Clim Extrem* 39 (2023) 100545.

Marengo, J.A., M.E. Seluchi, A.P. Cunha, L.A. Cuartas, D. Goncalves, V.B. Sperling, A.M. Ramos, G. Dolif, S. Saito, F. Bender, T.R. Lopes, R.C. Alvala, O.L. Moraes, Heavy rainfall associated with floods in southeastern Brazil in November–December 2021, *Natural Hazards* 116 (2023) 3617–3644. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05827-z>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-023-05827-z>. Acesso em set. 2024.

Marengo, J. A.; Cunha, A. P.; Seluchi, M. E.; Camarinha, P. I.; Dolif, G.; Sperling, V. B.; Alcântara E. H.; Ramos, A. M.; Andrade, M. M.; Stabile, R. A.; Mantovani, J.; Park, E.; Alvalá, R. C.; Moraes, O. L.; Nobre, C. A. Heavy rains and hydrogeological disasters on February 18-19, 2023 in the city of São Sebastião on the northern coast of the state of São Paulo, Brazil: Submitted to *Natural Hazards*, November 11, 2023. (NHAZ-D-23-02074).

MacNaughton, P. et al., 2018: Energy savings, emission reductions, and health co-benefits of the green building movement review-article. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 28(4), 307–318, doi:10.1038/s41370-017-0014-9. Disponível em: doi:10.1038/s41370-017-0014-9. Acesso em set. 2024.

Marmontel, M., Fleischmann, A., Val, A. and Forsberg, B., 2024. Safeguard Amazon's aquatic fauna against climate change. *Nature*, 625(7995), pp.450-450.

McColl, L. et al., 2012: Assessing the potential impact of climate change on the UK's electricity network. *Clim. Change*, 115(3–4), 821–835, doi:10.1007/s10584-012-0469-6. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-012-0469-6>. Acesso em set. 2024.

Milhorance, C., Sabourin, E., Le Coq, J.F., Mendes, P., 2020. Unpacking the policy mix of adaptation to climate change in Brazil's semiarid region: enabling instruments and coordination mechanisms. *Clim. Policy* 20 (5), 593–608. <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1753640>.

N

Nabuurs, G-J., R. Mrabet, A. Abu Hatab, M. Bustamante, H. Clark, P. Havlík, J. House, C. Mbow, K.N. Ninan, A. Popp, S. Roe, B. Sohngen, S. Towprayoon, 2022: Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU). In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.009. Disponível em: <https://research.wur.nl/en/publications/agriculture-forestry-and-other-land-uses-afolu>. Acesso em set. 2024.

Niemeyer, J., & Vale, M. M. (2022). Obstacles and opportunities for implementing a policy-mix for ecosystem-based adaptation to climate change in Brazil's Caatinga. *Land Use Policy*, 122, 106385. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106385>. Acesso em set. 2024.

NOAA (2024) National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html#global>. Acesso em out. 2024.

Nobre, C. A.; Marengo, J. A. ; Seluchi, M.E ; CUARTAS, L. A. ; ALVES, L. ; ALVEZ, L. M. . Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 8, p. 252-262, 2016.

O

Ometto, J.P., K. Kalaba, G.Z. Anshari, N. Chacón, A. Farrell, S.A. Halim, H. Neufeldt, and R. Sukumar, 2022: Cross-Chapter Paper 7: Tropical Forests. 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 [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2369–2410, doi:10.1017/9781009325844.024. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Citation.pdf. Acesso em set. 2024.

Organização Mundial da Saúde, 2018: World Health Statistics 2018: monitoring health for the SDGs: sustainable development goals. World Health Organization, Geneva, Switzerland, 86 pp.

P

Panteli, M. and P. Mancarella, 2015: Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies. Electr. Power Syst. Res., 127, 259–270, doi:10.1016/ J.EPSR.2015.06.012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877961500187X>. Acesso em set. 2024.

Patt, A., L. Rajamani, P. Bhandari, A. Ivanova Boncheva, A. Caparrós, K. Djemouai, I. Kubota, J. Peel, A.P. Sari, D.F. Sprinz, J. Wetterstad, 2022: International cooperation. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.016. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2022-mitigation-of-climate-change/international-cooperation/4310C829D15FADBA3BADEB592CFAC37A>. Acesso em set. 2024.

Pörtner, H.-O., D.C. Roberts, H. Adams, et all (2022): Technical Summary. [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. 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 [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 37–118, doi:10.1017/9781009325844.002. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Citation.pdf. Acesso em set. 2024.

R

Riahi, K., R. Schaeffer, J. Arango, K. Calvin, C. Guivarch, T. Hasegawa, K. Jiang, E. Kriegler, R. Matthews, G.P. Peters, A. Rao, S. Robertson, A.M. Sebbit, J. Steinberger, M. Tavoni, D.P. van Vuuren, 2022: Mitigation pathways compatible with long-term goals. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.005. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2022-mitigation-of-climate-change/mitigation-pathways-compatible-with-longterm-goals/7C750344E39ECA3BD5CB14156FCEEEF9>. Acesso em set. 2024.

Ribeiro, D. F.; Saito, S. M.; Alvalá, R. C. S. Community disaster resilience in Brazilian small urban centers. Accepted to International Journal of Disaster Risk Reduction, December 13, 2023. Manuscript Number: IJDRR-D-23-02768R1. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212420923006805?via%3Dihub>. Acesso em set. 2024.

Ribeiro, D. F.; Saito, S. M.; Alvalá, R. C. S. Disaster vulnerability analysis of small towns in Brazil. International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 68, January 2022, 102726. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212420921006877?via%3Dihub>. Acesso em set. 2024.

Romanello M, McGushin A, Di Napoli C, et all (2021) The 2021 report of the Lancet Countdown on health and climate change: code red for a healthy future. Lancet. 30;398(10311):1619-1662. doi: 10.1016/S0140-6736(21)01787-6.

S

Saito, S. M. et al. População urbana exposta aos riscos de deslizamentos, inundações e enxurradas no Brasil. *Sociedade & Natureza*, v. 31, 29 nov. 2019.

Scarano, F.R., 2017. Ecosystem-based adaptation to climate change: concept, scalability and a role for conservation science. *Perspect. Ecol. Conserv.* 15 (2), 65–73. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1679007316301621>. Acesso em set. 2024.

Schipper, E.L.F., A. Revi, B.L. Preston, E.R. Carr, S.H. Eriksen, L.R. Fernandez-Carril, B.C. Glavovic, N.J.M. Hilmi, D. Ley, R. Mukerji, M.S. Muylaert de Araujo, R. Perez, S.K. Rose, and P.K. Singh, 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* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2655–2807, doi:10.1017/9781009325844.027.

Silva, J.M.C., Barbosa, L.C.F. (2017). Impact of Human Activities on the Caatinga. In: Silva, J.M.C., Leal, I.R., Tabarelli, M. (eds) *Caatinga*. Springer, Cham. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-68339-3_13. Acesso em set. 2024.

Soterroni, A. et al. (2018). Future environmental and agricultural impacts of Brazil’s Forest Code. *Environmental Research Letters*, Vol. 13, Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaccbb>. Acesso em set. 2024.

T

Torres, R.R., Lapola, D.M., Gamarra, N.L.R. (2017). Future Climate Change in the Caatinga. In: Silva, J.M.C., Leal, I.R., Tabarelli, M. (eds) *Caatinga*. Springer, Cham. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3_15. Acesso em set. 2024.

The Nature Conservancy News Letter, 2024.

U

UNEP (2024) United Nations Environment Programme (2024). Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments. Nairobi. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404>.

UNICEF (2022) United Nations Children's Fund. Disponível em: <https://www.unicef.org/brazil/comunicados-de-imprensa/criancas-e-adolescentes-sao-os-que-mais-sofrem-com-mudancas-climaticas-e-precisam-ser-prioridade>. Acesso em out. 2024.

UNITED NATIONS. World Urbanization Prospects. New York, United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wup>. Acesso em 29 de outubro de 2020.

Urban, M.C., 2015. Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, 348(6234), pp.571-573.

W

Wilhite, D.A. and Glantz, M.H. (1987) Understanding: The Drought Phenomenon: The Role of Definitions. In: Wilhite, D.A., Easterling, W.E. and Wood, D.A., Eds., *Planning for Drought: Toward a Reduction of Social Vulnerability*, Westview Press, Boulder, CO, 11-30.

WMO (2025). Provisional State of the Global Climate 2023. Annual Report. Disponível em: <https://wmo.int/sites/default/files/2023-11/WMO%20Provisional%20State%20of%20the%20Global%20Climate%202023.pdf>. Acesso em set. 2024.

World Bank, 2012: Inundações Bruscas em Pernambuco: Junho de 2010. Relatório elaborado pelo Banco Mundial com apoio do Governo do Estado de Pernambuco, 75 pp., Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/pt/495391468013874079/pdf/NonAsciiFileName0.pdf>. Acesso em set. 2024.

Y

Yalew, S. G., van Vliet, M. T., Gernaat, D. E., Ludwig, F., Miara, A., Park, C., ... & Van Vuuren, D. P.. Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios. *Nature Energy*, 5(10), 794-802. 2020.

Yalew, S.G. et al., 2020: Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios. *Nat. Energy*, 5(10), 794-802, doi:10.1038/s41560- 020-0664-z. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41560-020-0664-z>. Acesso em set. 2024.



MUDANÇA DO CLIMA NO BRASIL

SÍNTESE ATUALIZADA E PERSPECTIVAS
PARA DECISÕES ESTRATÉGICAS

