

2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS



Disclaimer: As opiniões expressas no texto são tão e somente as opiniões dos autores e não expressam, direta ou indiretamente, as opiniões ou posições de suas instituições ou do MMA, PNUMA, IPEA ou FGV, ou demais organizações que participam do GEO BRASIL 2025.

Para citar este documento utilize:

MMA, PNUMA, FGV e IPEA (2025). GEO BRASIL 2025: Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil. Rio de Janeiro: FGV e Brasília: MMA. Disponível em:

<https://repositorio.fgv.br/items/f266d8d3-fcba-4ff8-b7c0-6bc4167f56b6> ou

<https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes>

A CRISE CLIMÁTICA NO BRASIL: TENDÊNCIAS, DESAFIOS E CAMINHOS EMERGENTES

Autores: Carlos A. Nobre¹, Julia Arieira², Luiza Muccillo³, Diego Oliveira Brandão², Eduardo Assad⁴

¹Universidade de São Paulo (USP), Instituto de Estudos Avançados, São Paulo, 05508-050, Brasil; Copresidente do Painel Científico para a Amazônia (SPA).

²Painel Científico para a Amazônia (SPA), Sustainable Development Solutions Network (SDSN), São José dos Campos, 12245-010, Brasil

³Earth Innovation Institute (EII), 2991 Sacramento Street, #509, Berkeley, CA 94702

⁴Fundação Getúlio Vargas FGVAgro- Observatório da Bioeconomia Av. Paulista, 542-3º Andar Bela Vista São Paulo CEP 01310-000

Sumário Executivo

Avaliação das mudanças climáticas no Brasil

Nos últimos 25 anos, o aquecimento global se intensificou de forma sem precedentes, impulsionado por decisões que mantêm crescentes emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) pela queima de combustíveis fósseis, destruição de ecossistemas e por atividades agropecuárias. Como sexto maior emissor de GEE e guardião das maiores florestas tropicais, o Brasil tem papel central na mitigação e adaptação climática. Entre o segundo semestre de 2023 e abril de 2025, a temperatura média global ultrapassou o limite crítico de 1,5°C acima do período pré-industrial (1850–1900). Em 2022, as emissões globais ultrapassaram 50 GtCO₂, sendo 76% provenientes do setor de energia, especialmente em países industrializados como China e Estados Unidos, enquanto os usos da terra (desmatamento e agropecuária) responderam por 21% das emissões. Em 2022, 70% das emissões do Brasil tiveram origem no desmatamento e agropecuária, sendo 39,5% desmatamento e 30,5% agropecuária.

As mudanças climáticas globais, incluindo no Brasil, se intensificaram nas últimas décadas, com aumento consistente das temperaturas, ampliação de condições semiáridas, e maior frequência de eventos extremos, como

secas severas, chuvas intensas e ondas de calor. As mudanças climáticas no Brasil têm causado aquecimento generalizado em todos os biomas, com destaque para aumentos históricos no Pantanal (~3°C) e no Cerrado (até 4°C) em máximas e mínimas sazonais, enquanto a Mata Atlântica, o Pampa, a Amazônia e a Caatinga também registram elevações significativas de temperatura ao longo das últimas décadas. O aquecimento acelerado está associado à expansão da região semiárida, maior frequência de eventos extremos e redução da precipitação em grande parte do território brasileiro.

De acordo com o relatório de 2025 da Agenda 2030, o desempenho brasileiro permanece crítico no cumprimento da ODS 15, que visa proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, comprometendo diretamente as ações de enfrentamento das mudanças climáticas nacionais e globais (ODS 13). As elevadas taxas de desmatamento no Brasil entre 2018 e 2021 (23.740 km²/ano) elevaram as emissões líquidas nacionais de cerca de 1,5 para 2,1 Gt CO₂e — patamar não observado desde 2008. Entre 1999 e 2018, Amazônia e Cerrado concentraram 80% dos mais de 16 milhões de focos de calor detectados no país, liberando 8,1 Gt CO₂e. A substituição da vegetação nativa por lavouras ou pastagens desencadeia mudanças biofísicas, como observado no Cerrado, elevando as temperaturas médias em cerca de 0,9 °C e 0,6 °C, respectivamente,

enquanto florestas secas degradadas da Caatinga podem apresentar temperaturas até 3 °C mais altas que áreas conservadas. Estima-se que 75% da redução das chuvas na estação seca (~21 mm) nos últimos 35 anos na Amazônia tenha sido causada pelo desmatamento.

A conservação e a regeneração da vegetação natural — especialmente em Terras Indígenas (TIs) e Unidades de Conservação (UCs) — são cruciais para a redução das emissões líquidas de GEE no Brasil. UCs e TIs armazenam 58% do carbono da Amazônia (42 GtC), desempenhando papel crítico nos estoques nacionais. Em 2023, 61% das emissões do setor de Mudança de Uso da Terra foram compensadas pela remoção de 642 Mt CO₂e, majoritariamente pela vegetação primária (60%) e regeneração natural (39,5%). Entre 2017 e 2022, a vegetação secundária cobriu cerca de 5 milhões de hectares fora de terras públicas, alcançando quase metade da meta de restaurar 12 milhões de hectares até 2030. Apesar disso, essa vegetação ainda não é formalmente protegida, tornando incertos seus benefícios de longo prazo para mitigação climática.

As elevadas emissões incorporadas nas importações provenientes do comércio internacional evidenciam os desafios do Brasil na transição para uma economia de baixo carbono. Apesar da matriz elétrica brasileira ter 85% de participação renovável, a dependência de combustíveis fósseis ainda é significativa, gerando 395,6 Mt CO₂e em 2022. Além disso, 38% da pegada energética e 38,5% da pegada de carbono vêm de importações, evidenciando os desafios de mitigar as emissões incorporadas no comércio internacional.

As mudanças climáticas têm causado impactos graves e crescentes na biodiversidade e na população brasileira, elevando o risco de pontos de não

retorno ecológicos e agravando problemas sociais e econômicos, incluindo pobreza, insegurança alimentar, riscos à saúde e geração de energia limpa, e acesso limitado a água doce no país. Desmatamento, degradação e mudanças climáticas ameaçam a biodiversidade e reduzem a resiliência dos ecossistemas, aproximando os ecossistemas de pontos de não retorno. No semiárido nordestino, a seca, a variabilidade das chuvas, falta de irrigação e degradação do solo tornam a agricultura familiar especialmente vulnerável às secas extremas. Chuvas intensas e ondas de calor também afetam a saúde pública, intensificando doenças infecciosas, aumentando as hospitalizações por doenças cardiovasculares, e comprometendo o abastecimento de água e o bem-estar de populações vulneráveis, incluindo crianças, idosos e comunidades tradicionais. A magnitude desses impactos é influenciada pela urbanização, degradação ambiental, acesso ao saneamento, desigualdades sociais e eficácia das políticas de saúde.

Desde 2000, o país vem construindo um arcabouço jurídico e institucional robusto para a política climática, com destaque para a Política Nacional sobre Mudança do Clima (2009), o fortalecimento dos planos setoriais e subnacionais, e a formulação do Plano Clima 2024–2035, que consolida os eixos de mitigação, adaptação e transição ecológica de longo prazo. Desde os anos 2000, o país vem avançando de uma estrutura centralizada para uma governança climática multinível, com destaque para o Plano Clima 2024–2035, o Pacto pela Transformação Ecológica e o Compromisso pelo Federalismo Climático (2024). Iniciativas como o PPCDAm, Planaveg e o Programa ABC+ articulam mitigação, adaptação e transição energética, embora desafios persistam quanto à integração institucional, financiamento e participação social.

Figura 2.1 - Modelo DPSIR aplicado às mudanças climáticas no Brasil.



Fonte: elaborado pelos autores.

Forças motrizes das mudanças climáticas no Brasil

O planeta enfrenta uma emergência climática, com efeitos que se consolidam como uma das maiores ameaças à estabilidade ecológica e à segurança humana no século XXI (IPCC 2003). Entre o segundo semestre de 2023 e abril de 2025, a temperatura média global ultrapassou o limite crítico de 1,5°C acima do período pré-industrial (1850–1900), enquanto eventos extremos — como secas prolongadas, chuvas torrenciais, fortes rajadas de vento, ondas de calor, incêndios florestais e elevação do nível do mar — têm causado impactos severos em ecossistemas e populações ao redor do mundo (IPCC, 2023). O ano de 2024 foi registrado como o mais quente em 175 anos de medições, com temperatura média global de 1,55±0,13°C acima do período pré-industrial (WMO, 2025). No cenário internacional, o Brasil assume seu papel ao ratificar o Protocolo de

Quioto e o Acordo de Paris (COP21, 2015), estabelecendo na sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) metas ambiciosas de redução de 59% a 67% das emissões líquidas de gases do efeito estufa até 2035, considerando 2005 como ano de referência. Além disso, ocupa posição central nas decisões climáticas, apresentando grande potencial para soluções baseadas na natureza no combate à crise climática, como conservação, restauração florestal e manejo sustentável de ecossistemas.

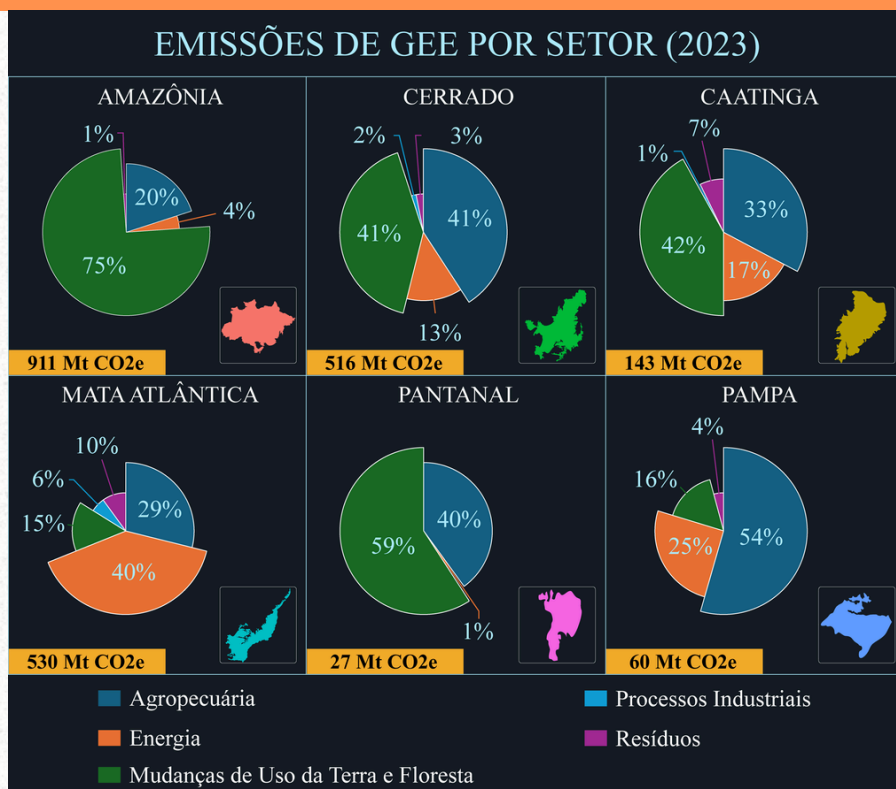
Os ecossistemas naturais brasileiros — como florestas tropicais úmidas, savanas tropicais e florestas estacionais — exercem um papel estratégico na estabilidade climática, indo muito além da função de sumidouros de carbono. Juntas, as florestas tropicais úmidas — como a Amazônia e a Mata Atlântica — e as savanas tropicais, como o Cerrado brasileiro, cobrem cerca de 67% da América do Sul (Borma et al., 2022). Por meio do sequestro de CO₂ e da regulação climática via evapotranspiração e transporte de umidade (Costa et al., 2021), esses ecossistemas naturais contribuem de forma integrada para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas — apoiando iniciativas REDD+ (Redução de Emissões de gases de efeito

estufa provenientes do Desmatamento e da Degradação florestal), e os compromissos de restauração florestal assumidos no Acordo de Paris (COP21, 2015). Dotados de uma das maiores biodiversidades do planeta, coproduzem os próprios processos ecológicos que sustentam o clima e o ciclo hidrológico (Borma et al., 2022).

As mudanças climáticas já são uma realidade consolidada e figuram entre as maiores ameaças à estabilidade ecológica e à segurança humana no século XXI (Ranasinghe et al., 2021). Essas mudanças resultaram do contínuo acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, devido aos padrões insustentáveis de geração de energia, produção, consumo e uso da terra em escala global (IPCC, 2023). Anualmente, mais de 40 bilhões de toneladas de CO₂ são

lançadas na atmosfera (Friedlingstein et al., 2024). Em 2022, as emissões globais ultrapassaram 50 GtCO₂, sendo 76% provenientes do setor de energia, especialmente em países industrializados como China e Estados Unidos, enquanto os usos da terra (desmatamento e agropecuária) responderam por 21% das emissões (IPCC, 2014; Crippa et al., 2023). O Brasil figura entre os seis maiores emissores do mundo, com um perfil de emissões fortemente ligado à conversão de ecossistemas naturais: em 2022, 70% das emissões nacionais tiveram origem no desmatamento e agropecuária, sendo 39,5% desmatamento e 30,5% agropecuária (MCTI, 2025). A contribuição de cada setor apresenta variações regionais (Figura 2.2).

Figura 2.2 - Emissões brutas de CO₂e por setor econômico em 2023 nos seis biomas brasileiros.



Fonte: elaborado pelos autores. Dados SEEG, 2025.

As disparidades nas emissões de GEE per capita entre países e regiões são notáveis. Enquanto a média global em 2023 foi de 6,6 tCO₂e por habitante ao ano, sem considerar LULUCF, Estados Unidos e Rússia registram entre 18 e 19 tCO₂e, respectivamente (Olhoff et al., 2024), refletindo altos padrões de consumo e forte dependência de combustíveis fósseis. Em 2023, o Brasil registrou emissões brutas per

capita de 12,8 tCO₂e - considerando todas as fontes de emissões de GEE. O setor energético é responsável por 21% das emissões brasileiras (MCTI, 2025), ocupando uma posição central nos debates atuais sobre mitigação no país. Embora o Brasil se destaque internacionalmente por sua elevada participação de fontes renováveis — como biodiesel, hidráulica, e as emergentes energias solares e eólicas (MME, 2025) —, o

setor energético ainda enfrenta desafios estruturais para alcançar a descarbonização plena.

Enquanto as mudanças climáticas se manifestam como fenômenos físicos, suas forças motrizes estão profundamente enraizadas em dinâmicas sociais, políticas e econômicas (Paterson, 2019; Hecht et al., 2021), que resultaram na queima de combustíveis fósseis e a conversão e degradação de ecossistemas. Modelo de desenvolvimento baseado na exploração intensiva dos recursos naturais para produção e exportação de commodities — como o que se consolidou no Brasil — contribui diretamente para o agravamento da crise climática. A agricultura moderna, moldada pelos preceitos da Revolução Verde, caracterizou-se pela mudança de paradigma na produção agropecuária a partir de um conteúdo tecnocientífico adaptado às condições tropicais, de transformar terra, trabalho e capital em commodities de demanda altamente crescente, priorizando produtividade e competitividade por meio de mecanização, fertilizantes químicos, sementes modificadas, uso excessivo de defensivos agrícolas e irrigação intensiva. Esse modelo, associado a políticas de colonização agrícola e crédito subsidiado, impulsionou principalmente a expansão da fronteira agropecuária, destacando-se a pecuária extensiva, responsável por 68% das emissões do país em 2022, provenientes tanto do desmatamento quanto da criação de animais (MCTI, 2025). Embora este modelo tenha promovido ganhos expressivos em produção em algumas regiões, também gerou desmatamento, degradação ambiental, concentração fundiária e desigualdades sociais (Octaviano, 2010). Essa lógica de exploração intensiva de recursos se reflete também no setor energético, historicamente dominado pela queima de combustíveis fósseis. Fatores como crescimento populacional e aumento da renda impulsionam as emissões de CO₂ relacionadas à energia (Koilkou et al., 2024), enquanto forças econômicas e políticas globais, por meio do lobby climático dos setores de transporte e combustíveis fósseis, reforçam a manutenção desse modelo de produção energética baseado em combustíveis fósseis (Brulle, 2018).

Os efeitos colaterais desse modelo de desenvolvimento não se distribuíram de forma homogênea pelo território, refletindo dinâmicas regionais marcadas por desigualdades históricas, decisões políticas, interesses econômicos, incentivos institucionais e fluxos comerciais (Benzeev et al., 2022; De Castro et al., 2022; Costa et al., 2023). Na Amazônia, a expansão da pecuária sobre áreas de floresta muitas vezes encobre o principal interesse na região: a especulação fundiária, amparada por sistemas de ilegalidades que envolvem posse ilegal de terra pública ou não destinada, mineração e extração de madeira (Costa et al., 2023). No Cerrado, bioma que concentrou 48% da produção nacional de soja em 2015 (Soterroni et al., 2019), a conversão de ecossistemas nativos em lavouras de soja, milho, algodão e cana-de-açúcar continua sendo incentivada por políticas públicas que oferecem subsídios, isenções fiscais e perdão de dívidas (Pires, 2020; Rodrigues et al., 2022). Na Mata Atlântica, o desmatamento é impulsionado por uma combinação de fatores históricos e contemporâneos, incluindo a expansão agropecuária intensiva, o crescimento urbano desordenado em áreas de risco, fragilidades na aplicação da legislação ambiental e o aumento da vulnerabilidade ao fogo em regiões fragmentadas (MMA, 2025).

Esse contexto exige um novo tipo de conhecimento e ações, capazes de integrar histórias profundas de exploração dos recursos naturais e inequidade social com os desafios contemporâneos de mitigação e adaptação climática. Superar a lógica que reduz o clima a metas de emissão é essencial: é preciso compreendê-lo como uma condição estruturante da vida contemporânea — uma força que molda e é moldada por práticas cotidianas, decisões corporativas, políticas públicas e infraestrutura. Nessa perspectiva, o Brasil deve liderar ações climáticas ancoradas na justiça social, ciência e inovação e responsabilidade ecológica, promovendo a conservação e a restauração de seus biomas e fortalecendo a descarbonização dos setores de uso da terra, agropecuária e energia.

Pressões sobre o sistema climático regional

As mudanças climáticas no Brasil são influenciadas por ações humanas associadas principalmente ao desmatamento, à degradação florestal, às queimadas e ao manejo da terra para usos agrícolas (MCTI, 2021; Tsai et al., 2024). Esses processos constituem fortes pressões sobre o sistema climático, alterando-o por meio da perda e da degradação da vegetação natural e do uso intensivo do solo, que provocam mudanças nos ciclos biogeoquímicos e resultam no aumento das emissões de dióxido de carbono (CO₂) e de outros gases de efeito estufa, como óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) e ozônio (O₃),

contribuindo para o aquecimento global. Ao mesmo tempo, desencadeiam mudanças biofísicas nos fluxos de água, calor e energia, influenciando diretamente o clima em escalas local e regional.

Desmatamento, Degradação Florestal e Queimadas

Alterações biogeoquímicas

O desmatamento continua sendo o principal vetor de emissões de GEE no Brasil, refletido nas flutuações nacionais registradas pelo Inventário Nacional de Emissões e Remoções de GEE (MCTI, 2025) (Figura 2.3). O Brasil acumulou uma perda de 379.835 km² de vegetação nativa entre 2008 e 2023, com incremento médio anual de desmatamento de 23.740 km² (INPE, 2025a) (Tabela 2.1). O Cerrado e a Amazônia representaram as maiores taxas médias de perda neste período, com 9.558 km² e 7.749 km², respectivamente (INPE, 2025b).

Tabela 2.1 - Resumo estatístico das taxas de desmatamento dos biomas brasileiros em quilômetros quadrados no período de 2008 a 2023.

Biomass	Acumulado	Média anual	Desvio padrão amostral	Menor taxa (Ano)	Maior taxa (Ano)
Amazônia	123.979	7.749	2.896	4.127 (2012)	12.479 (2022)
Caatinga	51.064	3.191	1.168	1.868 (2019)	6.351 (2008)
Cerrado	152.931	9.558	2.127	6.319 (2019)	13.482 (2013)
Mata Atlântica	24.174	1.511	783	765 (2023)	4.004 (2008)
Pampa	18.122	1.133	382	655 (2023)	2.119 (2014)
Pantanal	9.565	598	135	370 (2014)	824 (2021)
Brasil	378.835	23.740	4.617	(2017)	(2008)

Fonte: Dados do Terrabrasilis/INPE, 2025.

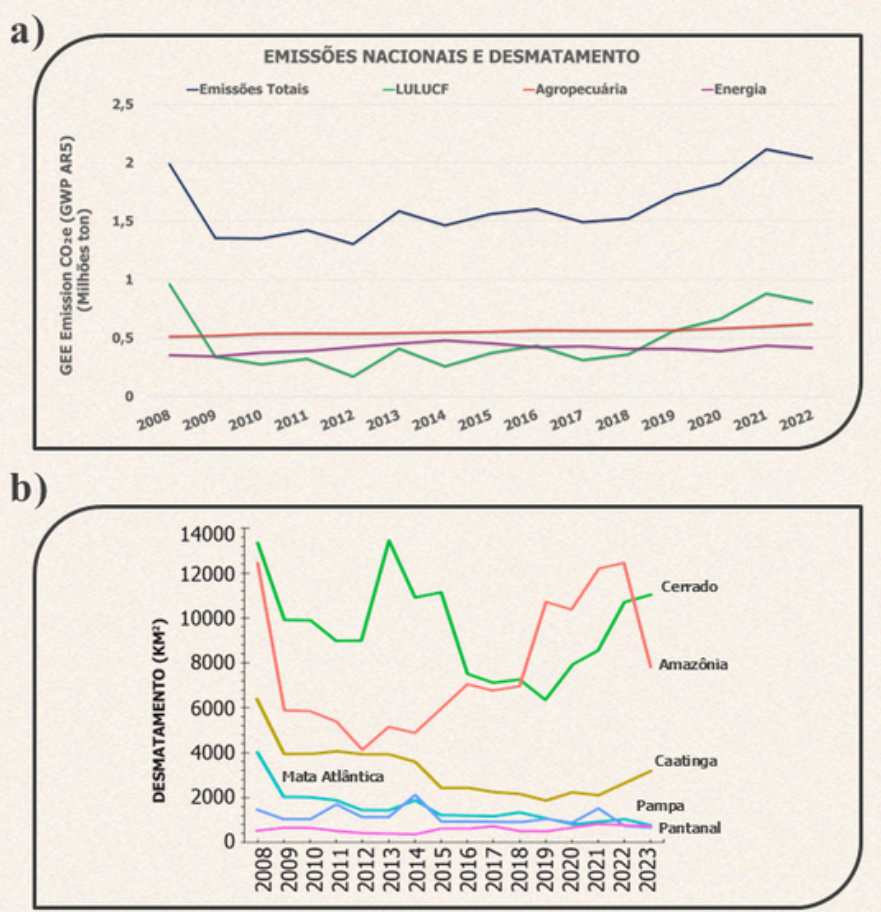
A expansão agropecuária respondeu por mais de 98% da perda de vegetação nativa entre 2019 e 2024, especialmente no Cerrado, na Amazônia e na Caatinga (Mapbiomas, 2025). As altas taxas de desmatamento de 2018 a 2021 resultaram em um aumento das emissões líquidas nacionais de cerca de 1,5 para 2,1 Gt CO₂e, um nível não observado desde 2008, enquanto as emissões por mudança de uso da terra (MUT) cresceram de 362 milhões para 883 milhões de tCO₂e, representando um aumento de aproximadamente 143,6%

no período. A escalada do desmatamento a partir de 2019 a 2021, causada pelo enfraquecimento e descontinuação do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm) e pela redução da capacidade estatal de combate e prevenção ao desmatamento (Candido et al., 2023; Soares et al., 2025), fez o país se afastar ainda mais das metas estabelecidas em acordos internacionais, aumentando em 22,5% as emissões líquidas nacionais e em 55,6% as emissões por MUT (MCTI, 2025). Segundo o SEEG (2025), as

emissões brutas nacionais de 2022 atingiram cerca de 2,6 Gt CO₂e (2,4 Gt CO₂e nos dados oficiais nacionais) (MCTI, 2025), das quais 53% derivaram de MUT, sendo 92,5% destes associados ao desmatamento da vegetação primária e secundária (SEEG, 2025). Amazônia e Cerrado foram

responsáveis por 89% das emissões (1,2 Gt CO₂e) por MUT e 45% do total nacional. O desmatamento reduziu apenas no Pampa (50,5%; 772 km²) e no Pantanal (4,36%; 36 km²), resultando em quedas de 52,8% (13 Mt CO₂e) e 17,1% (1,8 Mt CO₂e), em 2022 em relação ao ano anterior respectivamente (SEEG, 2025).

Figura 2.3 - A. Evolução histórica das emissões totais líquidas de GEE (em CO₂e) e pelos setores de Uso da Terra, Mudança no Uso da Terra e Florestas (LULUCF), Agropecuária e Energia. B. Desmatamento no Brasil (em km²) de 2008 a 2023.



Fonte: MCTI, 2025, INPE, 2025a.

Em 2023, a retomada das ações de combate e prevenção do desmatamento resultou em sua queda expressiva de 37% (4.667 km²) na Amazônia e de 14,9% no total nacional em relação a 2022 (INPE, 2025a). Neste ano, pela primeira vez no registro nacional, o desmatamento em formações de savana superou o de formações florestais, representando 54,8% e 38,5% do total, respectivamente (Mapbiomas, 2023). Enquanto o desmatamento na Amazônia recuava, as perdas de vegetação primária cresceram no Cerrado (32,8%; 3.148 km²), na Caatinga (11,3%; 511 km²) e no Pantanal (69,2%; 369

km²). Entre 2022 e 2023, cerca de 40.000 km² de florestas e savanas foram convertidos, sendo 44% para pastagens, 0,3% para lavouras e 0,005% para silvicultura (MapBiomas, 2023). Mesmo com essas perdas, a redução do desmatamento no Brasil contribuiu para a queda das emissões nacionais: em 2023, as emissões brutas por MUT caíram 23,7% e as totais do país caíram 11,9% segundo o SEEG (SEEG 2025), reforçando o papel das políticas de combate e prevenção do desmatamento.

Entre 2023 e 2024, o Brasil apresentou redução de 18,9% (comunicação pessoal Cláudio Almeida)¹ no desmatamento,

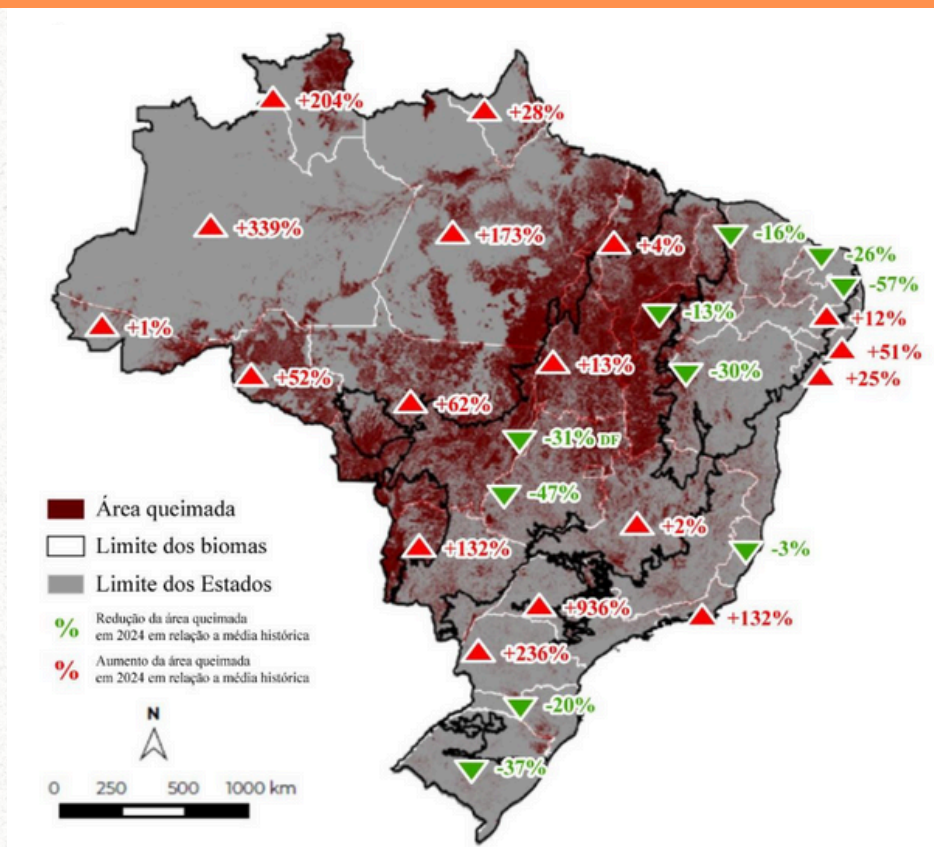
¹Os dados de desmatamento de 2024 dos seis biomas brasileiros estarão disponíveis até dezembro de 2025 no site TerraBrasilis (<https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/>).

impulsionada pela Amazônia, com queda de 22% entre agosto de 2023 e julho de 2024 (6.518 km²; 28% na Amazônia Legal), e pelo Cerrado, que registrou retração de 26% após anos de alta (INPE, 2025a). Em 2024, perdas em áreas de fisionomia herbáceo-arbustivas (52,4%) foram superiores às de áreas florestais (42,7%) (Mapbiomas, 2025a). Em 2024, o Cerrado concentrou 43% do desmatamento nacional, principalmente na fronteira agrícola do Matopiba — sul de Tocantins e partes do Maranhão, Piauí e Bahia —, responsável por 82% das perdas do bioma, embora apenas 3% da área tenha proteção legal estrita (IPAM, 2025; MapBiomas, 2025). A irregularidade é um fator central na trajetória de desmatamento e emissões no país. Entre 2019 e 2024, 82,4% da área desmatada apresentou indícios de irregularidade ou atividade ilegal, com 19,9% do desmatamento ocorrendo dentro de Reservas Legais, reforçando os desafios estruturais no combate ao desmatamento no Brasil (MapBiomas, 2023, 2025a).

A degradação florestal, embora não contabilizada formalmente nas emissões nacionais, é um importante emissor de GEE no Brasil, impulsionada por secas,

queimadas, fragmentação (efeito de borda) e extração seletiva de madeira (Lapola et al., 2023). Entre 2015 e 2024, a Amazônia brasileira registrou 214 mil km² de florestas degradadas, quase quatro vezes a área desmatada no mesmo período (59 mil km²), sendo 67% dessa degradação associada a cicatrizes de incêndio (INPE, 2025c). Estima-se que a degradação na Amazônia gere perdas de 0,18 a 0,73 Gt CO₂ por ano, valores comparáveis aos do desmatamento (Lapola et al., 2023). Os incêndios florestais — em sua maioria ilegais (95%) — são grandes emissores de CO₂, afetando 24% do território brasileiro entre 1985 e 2024 (Mapbiomas, 2025b) (Figura 2.4). Entre 1999 e 2018, Amazônia e Cerrado responderam por 80% dos mais de 16 milhões de focos de calor detectados no Brasil, emitindo 8,1 Gt CO₂e (Amazônia 60,7%; Cerrado 32%) (Silva Júnior et al., 2020). Em 2024, os incêndios no Pantanal liberaram 195 Mt CO₂ (Copernicus Atmosphere Monitoring Service, 2024). Na Caatinga, incêndios recorrentes de origem humana vêm aumentando, somando 21.550 ocorrências em 2023 — alta de 39% em relação a 2022 (Pivello et al., 2021; INPE, 2025c).

Figura 2.4 - Distribuição da área queimada acumulada por estados brasileiros (1985-2024) e tendência de redução ou aumento da área queimada em 2024 em relação à média histórica do estado



Fonte: IPAM, 2025b.

A conservação e a regeneração da vegetação natural — especialmente em Terras Indígenas (TIs) e Unidades de Conservação (UCs), são cruciais para a redução das emissões líquidas no Brasil. UCs e TIs armazenam 58% do carbono da Amazônia (42 Gt C), desempenhando papel crítico na manutenção dos estoques nacionais (Walker et al., 2020). Em 2023, 61% das emissões nacionais de LULUCF foram compensadas pela remoção de 642 Mt CO₂e, resultado da ação conjunta da vegetação primária e da regeneração natural (vegetação secundária), que responderam, respectivamente, por 60% e 39,5% dessa

remoção (SEEG, 2025). Desse total, 74% das remoções ocorreram na Amazônia, 10% no Cerrado e 7% na Mata Atlântica (SEEG, 2025) (Figura 2.5). Entre 2017 e 2022, a vegetação secundária ocupou cerca de 5 milhões de hectares fora de terras públicas, quase metade da meta brasileira de restaurar 12 milhões de hectares até 2030 (Dutra et al., 2024), concentrando-se principalmente na Amazônia e Mata Atlântica (Smith et al., 2021). Apesar de sua importância para a remoção de carbono, estas florestas ainda não possuem proteção legal, tornando incertos seus benefícios climáticos de longo prazo (Smith et al., 2021).

Figura 2.5 - Série histórica de emissões e remoções de GEE (CO₂e) por bioma.



Alterações biofísicas

A redução da cobertura florestal e savânica provoca alterações biofísicas que modificam os balanços de energia e água, comprometendo o papel da vegetação na estabilidade climática (Gash & Nobre, 1997; Lawrence et al., 2022; Rodrigues et al. 2022). O controle da temperatura da superfície terrestre depende de características essenciais da cobertura do solo, como albedo (i.e., quantidade de luz solar que é refletida), índice de área foliar, estrutura do

dossel, profundidade das raízes, umidade do solo e capacidade fotossintética (Borma et al. 2022). A conversão completa da floresta em pastagem ou monocultivos de culturas anuais pode elevar a temperatura média regional entre 2,5 °C e 4,2 °C na Amazônia (Nobre et al., 1991; Sampaio et al., 2007) (Figura 2.6). No Cerrado, a substituição da vegetação savânica por lavouras ou pastagens resulta em aumentos médios de 0,9 °C e 0,6 °C, respectivamente (Rodrigues et al., 2022), enquanto florestas secas degradadas da

Caatinga podem ser até 3°C mais quentes que florestas conservadas (Oliveira et al., 2021). A evapotranspiração das árvores contribui para umidificar a atmosfera e resfriar o microclima (Borma et al. 2022). Na Amazônia, a evapotranspiração da floresta é responsável por reciclar entre 24% e 35% da água da chuva (Costa et al., 2021). Estima-se que 74% da redução de 21 mm nas chuvas durante a estação seca, observada nos últimos 35 anos neste bioma, tenha sido causada pelo desmatamento (Franco et al., 2025), enquanto a degradação florestal pode diminuir a evapotranspiração nessa estação

entre 2% e 34% (Lapola et al., 2023). No Cerrado, a conversão da vegetação nativa em áreas agrícolas e pastagens pode reduzir a evapotranspiração anual em 39–44% e diminuir cerca de 10% o volume de água reciclada para a atmosfera (Rodrigues et al., 2022). Sob um cenário de desmatamento acelerado, a evapotranspiração anual do bioma poderia diminuir até 84 mm (171 km³) e a temperatura média aumentar 0,7°C até 2050, especialmente na região do Matopiba, que concentra áreas críticas de vegetação nativa sob pressão de conversão (Rodrigues et al., 2022).

Figura 2.6 - Efeitos da perda de cobertura florestal sobre as condições climáticas locais. A redução da evapotranspiração e da reciclagem de precipitação diminui a umidade do ar e a formação de nuvens, elevando a temperatura do ar e o déficit de pressão de vapor (DPV). A menor emissão de compostos orgânicos voláteis biogênicos (COV) reduz a formação de núcleos de condensação de nuvens (NCN), enfraquecendo os processos microfísicos de precipitação e intensificando o aquecimento e a aridificação locais.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A perda de vegetação natural e o uso intensivo do solo também alteram propriedades essenciais do solo, como conteúdo de matéria orgânica, umidade e porosidade, impactando a infiltração e a retenção de água no solo, que garantem suprimento de água para a vegetação em meses de precipitação reduzida (Sone et al., 2019, Rubert et al., 2018). Em áreas de Cerrado não perturbadas, a interceptação da copa da vegetação retém entre 4% e 20% da precipitação, favorecendo a infiltração, especialmente em solos arenosos (Oliveira et al., 2014). Graças a um sistema radicular profundo, fisionomias de cerrado denso

mantém taxas de evapotranspiração entre 1,8 e 2,2 mm por dia durante a estação seca — o que representa um acréscimo potencial de 216 a 264 mm de vapor d'água à atmosfera entre julho e outubro (Oliveira et al., 2005). O desmatamento, por outro lado, pode elevar o escoamento superficial em até 20 vezes, afetando o armazenamento de água no solo que, em camadas profundas (1–4 m), respondem por até cerca de 75% da água total utilizada em um Cerrado típico (Oliveira et al., 2015). Em áreas úmidas, como o Pantanal, barragem, dragagem, retificação de canais e o desmatamento podem reduzir a infiltração e a recarga do

lençol freático em períodos críticos na estação de seca, influenciando o fluxo de umidade entre rio e planície de inundação, e destes para a atmosfera (Fleishmann et al., 2023; Girard et al., 2025).

Uso e Manejo da Terra para Agricultura e Pecuária

A agricultura e a pecuária são atividades de grande relevância econômica nacional, cujo manejo — relacionado ao tamanho do rebanho, à escala e qualidade da produção agrícola e ao uso de insumos — tem impulsionado tendências crescentes de emissões no setor agropecuário (MCTI, 2022). Entre 2002 e 2022, as emissões do setor aumentaram 152 Mt CO₂e, correspondendo a um crescimento de 32,4%, segundo o sistema de registro nacional de emissões (MCTI, 2025). Em 2022, o setor respondeu por 30,5% das emissões líquidas nacionais (622 Mt CO₂e), abrangendo CH₄, N₂O, CO₂ e gases indiretos como monóxido de carbono (CO), NO_x e compostos orgânicos voláteis não metano (NMVOC) (MCTI, 2025). Em 2023, as emissões totais alcançaram 631 Mt CO₂e, com Cerrado, Amazônia e Mata Atlântica se destacando como principais emissores, somando 537 Mt CO₂e — aproximadamente 85% do total — conforme estimativas consolidadas pelo SEEG (2025). A Caatinga (47 Mt CO₂e) e o Pantanal (11 Mt CO₂e) registraram os maiores crescimentos recentes de emissões, com altas de 6% e 9,8% entre 2022 e 2023, enquanto o Pampa, único bioma com redução, emitiu 32,5 Mt CO₂e em 2023, caindo cerca de 2% entre 2021 e 2023.

A expansão da pecuária permanece como a principal força de pressão sobre os ecossistemas naturais e sobre os esforços de mitigação climática no Brasil. O rebanho bovino cresceu de 185 milhões de cabeças em 2002 para 239 milhões em 2023 — um aumento de aproximadamente 29% (Santos et al., 2024; Estevam et al., 2023). Esse crescimento influencia diretamente as emissões do setor, tanto pela fermentação entérica — responsável pela maior fração das emissões (65% em 2022) — quanto pelo manejo dos solos, que respondeu por 23% das emissões agropecuárias (MCTI, 2025). Em 2023, o setor concentrou 75,5% das emissões nacionais de metano (441 Mt CH₄), sendo a fermentação entérica responsável por

69% desse total (SEEG, 2025), com cada bovino emitindo, em média, 55 a 58 kg de CH₄ por ano (Assad et al. 2023). Mato Grosso, com o maior rebanho bovino do país (34 milhões de cabeças, 14% do total) e líder no uso de fertilizantes nitrogenados (1,2 milhão de t, 20% do consumo nacional) e calcário (21%), registrou 92,4 Mt CO₂e em 2023, correspondendo a 15% das emissões agropecuárias nacionais (SEEG, 2025). Embora o potencial de aquecimento global do metano seja cerca de 25 vezes maior que o do dióxido de carbono, sua vida atmosférica (9 a 12 anos) é de 5 a 20 vezes menor (Archer et al. 2009, Boucher et al., 2009), o que torna as estratégias de redução particularmente eficazes para resultados em médio prazo.

O Brasil possui cerca de 28 milhões de hectares de pastagens degradadas, com perda de fertilidade, substituição de forrageiras por espécies menos exigentes ou invasoras e aumento de solo exposto, evidenciando o papel crítico do manejo do solo nas emissões e remoções de GEE (Embrapa & LAPIG; Bolfe et al., 2024). Em 2023, as emissões brutas de carbono pelo solo no setor agropecuário somaram 92,6 Mt CO₂, sendo 48% provenientes de pastagens degradadas e 51% de lavouras convencionais (Tsai et al., 2024). Pastagens bem manejadas e em recuperação no Sul e Sudeste poderiam sequestrar 0,43–1,27 Gt CO₂ em 20 anos, contribuindo significativamente para mitigação (Fronza et al., 2024). A retenção de carbono no solo representa cerca de 25% do potencial das soluções climáticas naturais, combinando proteção de estoques existentes (40%) e recomposição de áreas degradadas (60%) (Bossio et al., 2020). No Cerrado, os solos armazenam até 78% do carbono do ecossistema (123,13 t C.ha⁻¹) (Terra et al., 2023; Fonseca & Bustamante, 2025), enquanto no Pantanal campos nativos acumulam 93–127 t C.ha⁻¹ no horizonte superficial (Freitas et al., 2024).

Energia

Entre 2000 e 2018, as emissões de CO₂ caíram 28%, sendo que o principal fator dessa redução foi a estrutura energética — influenciada pela alta participação de renováveis (27%) (Koilkou et al. 2024). A matriz elétrica brasileira é predominantemente renovável (84,4%), com 214 GW de potência

centralizada — 51% hídrica, 16% eólica, 8,8% solar e 8% biomassa — enquanto fontes não renováveis representam 29%, com destaque para gás natural (9,3%) e petróleo e derivados (3,6%), e menor participação de carvão mineral (1,8%) e energia nuclear (0,9%) (ANEEL, 2025). Em 2023, o transporte liderou as emissões do setor energético (224 MtCO₂e), seguido por indústria (154 Mt), produção de combustíveis (44 Mt), geração elétrica (38 Mt), edificações (30 Mt) e agropecuária (23 Mt) (Tsai et al., 2024). As emissões apresentam forte contraste regional: a Mata Atlântica lidera com 210,3 MtCO₂e, impulsionada por transporte (127,3 Mt), indústria (15,9 Mt) e produção de combustíveis (9,6 Mt); o Cerrado soma 68,9 Mt, principalmente transporte (46,4 Mt) e produção de combustíveis (39,2 Mt); a Caatinga (24,4 Mt) e a Amazônia (34,1 Mt) têm perfis dominados pelo transporte, com maior participação de agropecuária (2,2 Mt) e geração elétrica (5,3 Mt) na Amazônia; o Pampa registra 15,0 Mt, concentradas no transporte (7,4 Mt); e o Pantanal, apenas 0,2 Mt, refletindo baixa densidade populacional e limitada atividade industrial. Esses dados mostram que, mesmo com uma matriz energética três vezes mais limpa que a média global, o transporte e a indústria movidos a combustíveis fósseis, permanecem como principais determinantes das emissões do setor de energia do Brasil. Além disso, o uso total de energia no país também inclui combustíveis fósseis importados, o que adiciona uma pegada de carbono externa equivalente a 38,5% das emissões associadas. Essa dependência de importações reduz a participação efetiva de fontes renováveis no consumo energético brasileiro para cerca de 47,5%, evidenciando que os desafios de mitigação das emissões devem considerar as emissões incorporadas no comércio internacional (Montoya et al., 2021).

Mudanças climáticas no Brasil: Estado e projeções

O Brasil enfrenta mudanças climáticas caracterizadas pelo aumento contínuo da temperatura, intensificação de extremos — como secas prolongadas e chuvas severas — e maior variabilidade nos regimes de precipitação e vazões (Tabela 2.2). Essas tendências são potencializadas pelas interações entre aquecimento global e alterações do uso da terra, incluindo desmatamento, degradação florestal e manejo do solo, que afetam o clima regional e os regimes hidrológicos. Cenários futuros indicam intensificação dessas tendências, ressaltando a necessidade de fortalecimento de práticas e políticas de mitigação e adaptação climática. Dada a dimensão continental e a heterogeneidade ambiental e socioeconômica do país, análises regionalizadas são essenciais para orientar estratégias diferenciadas de mitigação e adaptação em cada bioma.

Amazônia

Nos últimos 40 anos (1979–2018), a floresta Amazônica apresentou um aquecimento médio de aproximadamente 1,02 °C (Gatti et al., 2021; Marengo et al. 2021a). Entre 1961 e 2000, a temperatura na Amazônia brasileira apresentou um aumento médio de aproximadamente 0,3 °C por década (Marengo et al., 2024). A tendência de aquecimento é evidente em todas as estações do ano, variando conforme os gradientes climáticos naturais da região, a sazonalidade e as mudanças no uso e cobertura da terra (Gatti et al., 2021; Marengo et al., 2021a, 2024). Nos meses mais secos (agosto-setembro), o aumento chega a 1,37 °C em 39 anos, enquanto o leste da Amazônia, que acumula grande parte do desmatamento, aquece quase duas vezes mais que o oeste, com até 2,5 °C na estação seca (Gatti et al., 2021). A atmosfera sobre a Amazônia também está se tornando progressivamente mais seca, com aumento contínuo do déficit de pressão de vapor entre 1979 e 2016 (Barkhordarian et al., 2019). Embora a precipitação média anual

na Amazônia não apresenta uma tendência significativa de mudança em toda a região, observa-se, durante a estação mais seca — entre agosto, setembro e outubro — uma redução de 17% na precipitação em 39 anos (Gatti et al., 2021). No sul da Amazônia, observa-se uma tendência de redução nos extremos de chuva, enquanto o norte apresenta comportamento oposto, especialmente durante a estação mais úmida (de dezembro a maio), quando o volume de precipitação aumentou de 180 para 600 mm entre 1979 e 2015 (Wang et al., 2018). No nordeste da região, com 37% da floresta suprimida, a precipitação anual caiu 9%, chegando a 34% de redução na estação seca; no sudeste, a queda foi de 24% (Gatti et al., 2021). A estação seca se prolongou 4–7 semanas na porção sul entre 1979 e 2019, atrasando cerca de 5 semanas seu término, aproximando a sazonalidade do Cerrado (Marengo et al., 2021a). Nos últimos 40 anos, a Amazônia intensificou extremos hidrológicos, com maior frequência e intensidade de secas e inundações (Marengo et al., 2021a, 2024). Mega-inundações ocorreram em 2009, 2012, 2014 e 2021, ligadas a La Niña e à fase quente do Atlântico Norte Tropical (Espinoza et al., 2022; Marengo et al., 2024). A seca severa passou de quatro eventos por século para quatro em menos de 25 anos (Costa et al., 2023). A seca de 2023–2024, associada a El Niño e à fase quente do Atlântico Norte, reduziu chuvas em 100–300 mm nos estados do Amazonas, Acre, Roraima e Rondônia (Costa & Marengo, 2023). Em 2024, o rio Negro em Manaus atingiu 12,17 m — o menor nível em 122 anos (SGB, 2024) — e temperaturas máximas bateram recorde, até 5,1 °C acima da média 1991–2020 (INMET, 2024). Em 2023, seis ondas de calor afetaram o oeste e norte da bacia durante seis meses (Costa et al., 2024). Modelos climáticos projetam aumento da temperatura média anual da Amazônia de até 2 °C em cenários moderados de GEE (RCP4.5) e 6 °C em cenários mais severos de mudanças climáticas (RCP8.5) até o final do século, com queda da precipitação, principalmente no sul e leste, e prolongamento da estação seca (Marengo et al., 2021b).

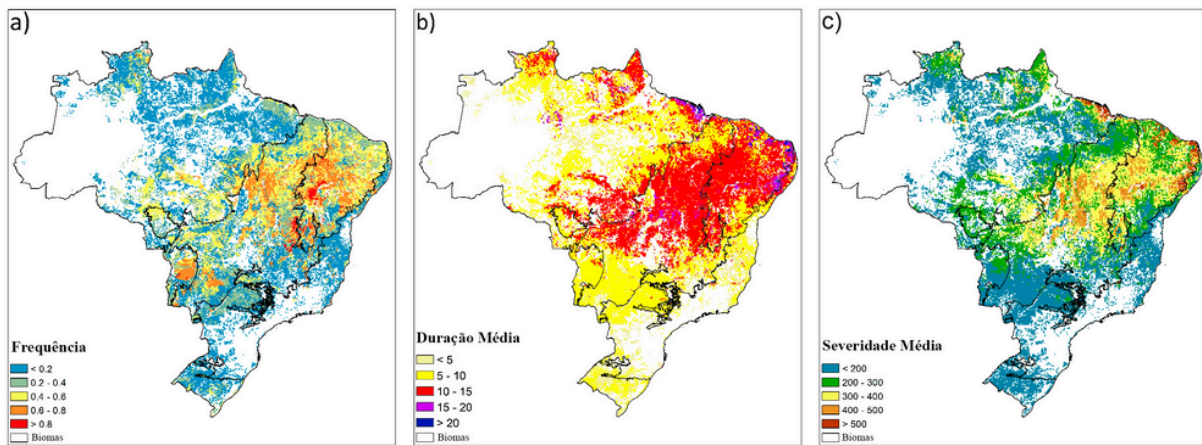
Cerrado

O Cerrado é um hotspot de biodiversidade altamente vulnerável às mudanças climáticas na América do Sul (Manes et al., 2021). Entre 1961 e 2019, o bioma registrou aquecimento acelerado, especialmente nas temperaturas máximas e mínimas durante a estação seca, com elevação das máximas entre 2,2 °C (agosto) e 4 °C (outubro) e aumento das mínimas mensais em até 2,8 °C em outubro (Hofmann et al., 2021). O aquecimento diurno e noturno tem sido intenso na estação seca e na transição seca–chuva, com taxas de 0,3 a 0,7 °C por década (Hofmann et al., 2025), refletindo a interação entre aquecimento global, desmatamento e queimadas. Além do aumento da temperatura, o Cerrado enfrenta crescente redução das chuvas variando regionalmente entre 5% e 15% do total anual entre 1960 a 2021, com diminuição de 5,2 dias de precipitação, especialmente na porção central; maiores quedas ocorreram no centro e oeste, enquanto Maranhão, sudeste de Minas Gerais e sul de São Paulo registraram aumento devido a dinâmicas atmosféricas e variações de altitude (Campos et al., 2020; Hofmann et al., 2023). A redução das chuvas iniciada nos anos 60 está associada ao aumento dos gases de efeito estufa e à expansão da célula de Hadley, que intensificou o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), deslocando a umidade para outras regiões e reduzindo o número de dias chuvosos. O aquecimento do Atlântico Tropical Norte também contribui para esta redução, através do enfraquecimento do transporte de umidade do oceano para o continente (Hofmann et al., 2025). Por fim, o desmatamento intensificou essa redução ao diminuir a evapotranspiração regional (Rodrigues et al., 2022). Entre 1961 e 2019, a umidade relativa do ar no Cerrado caiu cerca de 15% devido à redução da evapotranspiração (Hofmann et al., 2021). A interação entre desmatamento e mudanças climáticas reduziu a vazão dos rios em 19.718 m³/s ao longo de 33 anos, podendo chegar a 23.653 m³/s até 2050, equivalente a 33,9% de redução (Salmona et al., 2023), configurando tendências inéditas no bioma (Stríkis et al., 2024). O prolongamento do período seco e o aumento do déficit de pressão de vapor, combinados com a menor

precipitação, ampliam os meses de déficit hídrico, intensificando a aridez e o estresse da vegetação (Hofmann et al., 2025). Isso favorece a expansão de áreas semiáridas e secas repentinas, que reduzem rapidamente o conteúdo de água no solo (Tomasella et al., 2023, 2025; Hofmann et al., 2025) (Figura 2.7). Entre 1961 e 2020, o número, duração e severidade das secas repentinas aumentou, principalmente nas transições com Amazônia, Mata Atlântica e Caatinga, e na porção sul, concentrando eventos de 50–75 dias no centro e norte e os mais severos na região central (Tomasella et al., 2025). Projeções até o final do século indicam

redução da precipitação média anual de $-2,6$ (SSP2-4.5) a $-5,2\%$ (SSP5-8.5) (Centro-Oeste), $-2,0$ (SSP2-4.5) a $-4,6\%$ (SSP5-8.5) (Leste) e $-0,5$ (SSP2-4.5) a $+0,1\%$ (SSP5-8.5) (Sul), com verões mais chuvosos e primaveras mais secas. Espera-se forte aumento da sazonalidade e do déficit de pressão de vapor (VPD) — 34% a 68% (SSP5-8.5) no Centro-Oeste, 31% (SSP2-4.5) a 59% (SSP5-8.5) no Leste e 29% (SSP2-4.5) a 59% (SSP5-8.5) no Sul — indicando condições mais quentes e secas, maior estresse hídrico e risco elevado de incêndios (Cattelan et al., 2024).

Figura 2.7 - a) Frequência, b) duração e c) severidade de secas repentinas no Brasil considerando o intervalo de 1961 a 2020.



Fonte: Tomasella et al. 2025

Caatinga

A Caatinga possui uma faixa restrita de resiliência climática, o que a torna um dos biomas mais vulneráveis às mudanças climáticas (Pinho et al., 2020). Entre 1901 e 2000, a temperatura média da Caatinga aumentou cerca de $0,8^{\circ}\text{C}$, com redução de noites e dias frios e aumento menos pronunciado de noites e dias quentes (Torres et al., 2017). No período mais recente, entre 1981 e 2010, o aquecimento se intensificou, alcançando aproximadamente $1,4^{\circ}\text{C}$ (Delazeri et al., 2018). Enquanto a precipitação média anual não apresenta tendência clara de mudança no bioma, observa-se grande variabilidade sazonal e espacial nos padrões de chuva, com períodos secos intensificando e agravando a deficiência hídrica (Torres et al., 2017). Historicamente, a região semiárida do Nordeste, mais de dois terços coberta pela Caatinga, é marcada por secas recorrentes e degradação ambiental, problemas que se

reforçam mutuamente, criando ciclos de vulnerabilidade (Niemeyer e Vale, 2022). Observa-se intensificação das condições áridas na Caatinga, com áreas do centro-norte da Bahia, na divisa com Pernambuco, aproximando-se de condições desérticas devido ao aumento da demanda atmosférica por água associado ao aquecimento global. No período 1990–2020, surgiram 17.289 km^2 classificados como áridos, correspondendo à expansão do semiárido no centro da região Nordeste (Tomasella et al., 2023). Projeções para 2100 indicam agravamento das tendências históricas na Caatinga, com aquecimento de $1,3^{\circ}\text{C}$ ($0,5\text{--}1,9^{\circ}\text{C}$) em cenários de baixa concentração de GEE (RCP2.6) e até $4,4^{\circ}\text{C}$ ($2,7\text{--}6,2^{\circ}\text{C}$) em cenários de altas emissões (RCP8.5), sendo mais intenso no centro do bioma durante a estação seca (JJA) e na transição para a estação úmida (SON) (Torres et al., 2017). A precipitação apresenta maior incerteza, com redução média anual de até $0,3\text{ mm/dia}$ sob

altas emissões e aumento de eventos extremos de seca (Marengo et al., 2017). Dias consecutivos secos podem passar de 100 em 1901 para 140 em 2100 (Marengo et al., 2017), com déficits hídricos de 3–4 mm/dia após 2041 e aumento do período seco de 8 a mais de 28 dias entre 2071–2100, elevando o risco de incêndios (Torres et al., 2017; Pivello et al., 2021). Essas tendências projetam reconfiguração da Caatinga, com expansão do semiárido em 225.000 km² (1990–2020) sobre áreas hoje ocupadas por Mata Atlântica e Cerrado (Pinho et al., 2020; Tomasella et al., nota).

Mata Atlântica

As mudanças climáticas na Mata Atlântica apresentam padrões regionais distintos. No litoral, as temperaturas máximas aumentaram em média 2,2 °C, com redução de 9,7% na fração de dias frios, especialmente no nordeste do bioma (Bulhões & Zabiboni, 2025). Na faixa central, onde se concentra grande parte da população urbana, o aquecimento médio foi de 1,1 °C, influenciado tanto pelo aquecimento global quanto por fatores antrópicos, como urbanização e alterações no uso do solo (Abreu et al., 2019). Nessa região, extremos térmicos intensificaram-se: dias muito quentes subiram 0,12–0,32 °C/década e noites muito frias 0,06–0,21 °C/década, enquanto noites frias tornaram-se menos frequentes e noites quentes mais comuns, refletindo maior variabilidade térmica (Avila Diaz et al., 2020). No sul do bioma, o aquecimento foi mais intenso nas mínimas (+0,5 a +0,8 °C/década) do que nas máximas (+0,4 °C/década), reduzindo a amplitude térmica diária (Marengo & Camargo, 2008). A temperatura superficial do mar aumentou 0,5 °C em média (1982–1998 a 2000–2016), associada à intensificação da Corrente do Brasil e ao deslocamento da bifurcação da Corrente Sul-Equatorial (Franco et al., 2020). A precipitação também apresenta mudanças significativas: na faixa litorânea nordeste houve redução de 9,2 mm/ano (de 1961 a 2020) (Bulhões & Zabiboni, 2025); na região central (Sergipe a nordeste de São Paulo), os dias chuvosos diminuíram de 27 a 63 mm por década (1980–2016), períodos consecutivos de chuva reduziram-se e os de seca aumentaram, enquanto chuvas intensas tornaram-se mais frequentes,

elevando o risco de deslizamentos em áreas urbanas (Avila-Diaz et al., 2020; Marengo et al., 2021b). Em São Paulo, a precipitação anual aumentou 425 mm (1933–2010), com redução de chuvas fracas e crescimento de eventos intensos, intensificados pela ilha de calor urbana (Silva Dias et al., 2013). No sul do bioma (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul), a precipitação média pode aumentar mais de 15% em cenários de aquecimento global acima de 1,5 °C (Gulizia et al., 2022). Projeções sob o cenário RCP 8.5 indicam aumento médio de temperatura de 4,8–5,6 °C, com máximas podendo subir até 8 °C e mínimas 4–6 °C (Vale et al., 2021; Lyra et al., 2018). Eventos de calor extremo tornar-se-ão muito mais frequentes, enquanto ondas de frio praticamente desaparecerão, aumentando desconforto térmico, consumo energético e riscos à saúde (Silva Dias et al., 2013); no verão, ondas de calor devem passar de 5% (1961–1990) para 27% até 2055 em cenários otimistas e 40% em cenários de aumento de GEE (Feron et al., 2019). A precipitação total anual deve reduzir cerca de 12%, mas os dias muito úmidos devem aumentar 10% e eventos intensos 5%, enquanto períodos consecutivos de seca podem se alongar em aproximadamente 21%, indicando maior variabilidade e extremos hídricos no bioma (Avila-Diaz et al., 2020).

Pampa

O bioma Pampa é predominantemente um ecossistema campestre que, no Brasil, apresenta alta sensibilidade às variações climáticas, dependendo de uma faixa estreita de temperatura (18 °C a 22 °C) e de pluviosidade anual entre 1.100 e 2.000 mm. Tendências crescentes de aquecimento no bioma, assim como eventos extremos de precipitação, afetam a capacidade de seus ecossistemas de se recuperarem após distúrbios e desafiam a adaptabilidade de suas espécies (Pinho et al., 2020). Dados históricos indicam que, entre 1913 e 2006, os verões no Sul do Brasil tornaram-se mais chuvosos, com aumento de 93 mm por século sobre uma média de 367 mm. Durante o mesmo período, as temperaturas mínimas subiram 1,7 °C por século, enquanto as máximas apresentaram leve queda de 0,6 °C por século no verão (Sansigolo e Kayano, 2010). O Pampa é especialmente suscetível a eventos extremos de precipitação que tornam os verões mais úmidos, os quais,

diferentemente de outras regiões do Brasil, estão associados ao fenômeno El Niño. Por outro lado, episódios recentes de La Niña, como o prolongado e intenso evento de 2020–2022, resultaram em secas severas no bioma e em outras áreas do Sul do país (Da Rocha et al., 2021). Essas mudanças climáticas são agravadas pelo histórico de desmatamento e pela inserção da silvicultura em áreas de campos naturais, que resultaram em perda de 32% da vegetação campestre até 2022, influenciando o balanço hídrico regional (Pinho et al., 2020; MapBiomias, 2023). Além disso, secas repentinas, resultantes de déficits de chuva e alta evapotranspiração, têm se tornado cada vez mais frequentes no bioma, ainda que apresentem curta duração e baixa intensidade (Tomaselle et al., 2025).

A região que abrange o sul da Mata Atlântica e o bioma Pampa apresenta projeções consistentes de aquecimento sob cenários globais acima de 1,5 °C. O aumento da temperatura média do ar varia de +0,8 °C a +1,1 °C sob aquecimento global de 1,5 °C, e de +1,3 °C a +1,6 °C sob 2 °C, em relação ao período histórico de 1981–2000. A frequência de dias de geada e de gelo, já baixa no período histórico (0 a 10 dias por ano e praticamente nula em algumas áreas), apresenta projeções de redução de cerca de 1,6 dia/ano, alcançando valores próximos de zero mesmo sob 1,5 °C. O índice de precipitação máxima em cinco dias consecutivos tende a aumentar cerca de +7,7% sob cenário de aquecimento de 1,5 °C e +16,6% sob 3 °C, com picos de até +25%, alterando profundamente a dinâmica climática e ecológica regional (Gulizia et al., 2022). Com aquecimento de 2°C, espera-se um aumento no déficit hídrico de até 258 mm em anos secos ou normais e tendência de redução das chuvas no verão, o que prolonga a estação seca e agrava a escassez hídrica (Rocha et al., 2021). Mesmo com essa redução, há projeções de aumento da intensidade e concentração das chuvas, ampliando os riscos de inundações, estiagens e movimentos de massa (Marengo et al., 2021b, Cruz et al., 2023).

Pantanal

O Pantanal, a maior planície de inundação continental contígua do mundo, tem sofrido mudanças significativas em seu regime de cheias e secas, processos governados pela

variabilidade no regime de chuvas, principal motor da manutenção de sua biodiversidade e dos modos de vida tradicionais (Junk et al., 2016; Lázaro et al., 2020). Historicamente, o bioma alterna entre ciclos úmidos (1951–1964 e 1976–2000) e secos (1965–1975 e 2001–2021). Durante o ciclo seco de 1965–1975, por exemplo, o nível do rio Paraguai no município de Ladário, Mato Grosso do Sul, esteve 50% abaixo da média de longo prazo. Entre 1990 e 2020, o Pantanal registrou um aumento histórico de temperatura máxima de 0,76 °C por década, acumulando cerca de 3 °C nas últimas quatro décadas (Libonati et al., 2022). A aridez se intensificou especialmente no período 2001–2021, com a evapotranspiração potencial aumentando de 1.839 para 1.885 mm/ano, a temperatura média anual subindo de 25,0 °C para 25,6°C, e o déficit de pressão de vapor de 1,31kPa para 1,38 kPa, indicando maior estresse hídrico associado às mudanças climáticas (Caballero et al., 2025). Na região norte do Pantanal, registraram-se 13% mais dias sem chuva e redução de 16% na massa de água disponível durante a estação seca em 10 anos (Lázaro et al., 2020). A superfície de água anual caiu 68% em 2023 (381 mil ha), em comparação com a média histórica de 956 mil ha (1985–2023) (MapBiomias, 2023). Eventos combinados de calor e seca tornaram-se mais frequentes (Cunha et al., 2024; Calim Costa et al., 2024), com destaque para quatro grandes secas nas últimas quatro décadas: 1993–1994 (moderada), 2013–2014 (severa), 2019–2020 e 2023–2024 (megassecas). A seca de 2019–2020 foi inédita por afetar também áreas de planalto, resultando de aquecimento anômalo do oceano Pacífico Nordeste, redução de até 32% nas chuvas e intensificação do estresse hídrico. Esse aquecimento respondeu por 73,5% das anomalias de precipitação no Pantanal e 84,5% nos planaltos, com impactos detectados em apenas dois meses (Thielen et al., 2021; Caballero et al., 2025). A partir de junho de 2019, as chuvas ficaram 32% abaixo da média histórica, com 83,3% dos meses registrando precipitação inferior ao normal. Em nove meses, mais de 60% da planície e 30% dos planaltos já enfrentavam seca extrema. Em março de 2020, 90% do Pantanal estava em seca, sendo 60% em nível extremo, condição que ainda afetava 82,2% da área em junho de 2021 (Thielen et al., 2021). Cenários futuros sugerem que, até 2100, o Pantanal poderá enfrentar

aquecimento de até 7 °C e redução de até 30% da precipitação, intensificando déficits hídricos, eventos extremos e ameaçando a

resiliência socioecológica do bioma (IPCC, 2023).

Tabela 2.2 - Resumo das tendências climáticas observadas e projetadas nos seis biomas brasileiros

Bioma	Temperatura	Precipitação e Umidade do Ar	Extremos Climáticos	
Amazônia	Histórico	+1,02 °C (1979-2018); +0,3 °C/década (1961-2000); Meses secos ago-set +1,37 °C; Leste: +2 °C ano / +2,5 °C estação seca (1979 e 2018)	Estação seca (1979 e 2018): Total: redução 17%; Nordeste: -9%; Nordeste estação seca -34%; Sudeste anos; Sul: estação seca -24%; prolongamento estação seca 4-7 semanas Estação úmida (1979 e 2015): de 180 para 600 mm	Mega-inundações 2009, 2012, 2014, 2021; Secas severas: 4 eventos por século → 4 em < 25 anos Seca 2023-2024: precipitação -200 a -400 mm, 5 ondas de calor até 90 dias duração
	Projeção	+2°C (RCP4.5) a +6°C (RCP8.5)	Redução precipitação, prolongamento estação seca	Aumento frequência/intensidade secas e inundações
Cerrado	Histórico	Máximas meses secos(1961-2019): +2,2 °C (ago) a +4 °C (out); Mínimas: até +2,8 °C; Taxa aquecimento: +0,3-0,7 °C/década	Redução precipitação, prolongamento estação seca Redução da precipitação anual: 5-15%, dos dias de chuva: 5,2 dias, e da umidade relativa: 15% (1961 a 2019)	Secas repentinas (1961 e 2020): aumento do número, duração, severidade; Eventos de até 50-75 dias concentrados centro/norte do bioma
	Projeção	2100: -2,6 % a -5,2% (Centro-Oeste), -2,0 % a -4,6 % (Leste) e -0,5% a +0,1% (Sul)	aumento da sazonalidade: 12-18 % (Centro-Oeste), 13-20 % (Leste) e 11-17% (Sul) e do déficit de pressão de vapor (VPD) de 34-68% (Centro-Oeste), 31-59 % (Leste) e 29-59% (Sul)	Continuidade aumento aridez e estresse hídrico, expansão áreas semiáridas
Caatinga	Histórico	temperatura média: +0,8 °C (1901-2000); +1,4 °C (1981-2010); Redução noites/dias frios; Aumento menos pronunciado noites/dias quentes	Intensificação condições áridas	Secas recorrentes e prolongadas
	Projeção	+1,3 °C (RCP2.6) a +4,4 °C (RCP8.5), mais intenso centro do bioma e estação seca	Redução média anual 0,3 mm/dia (2100); Aumento eventos de seca; Dias consecutivos de seca: +40 dias (1901 a 2100); Prolongamento período seco 8 → >28 dias Déficit hídrico 3-4 mm/dia;	Expansão semiárido ~225.000 km²
Mata Atlântica	Histórico	Região Litorânea: máximas +2,2 °C e -9,7% dias frios (1961-2020); Parte Central: +1,1 °C (1955 e 2004); mais quentes: +0,12-0,32 °C/década; Noites mais frias: +0,06- 0,21 °C/década; Sul: mínimas +0,5-0,8 °C/década, máximas +0,4 °C/década; Superfície do mar +0,5 °C (2000-2016 versus 1950-1999)	Litoral nordeste (1961 e 2020): -9,2 mm/ano; Central (1986 e Dias 2005): total anual -27 a -63 mm/década; Períodos consecutivos de chuva -0,5-1,5 dias/década; Períodos consecutivos seca +0,9-4,7 dias/década; Sul: precipitação +15% (1981 e 2000)	Chuvas intensas/repentinhas em áreas metropolitanas
	Projeção	Temperatura média:+4,8-5,6 °C (2100); SP/RJ com Máximas+8 °C; Mínimas +4-6°C; Até 190 dias de ondas de calor	2100: Redução total anual ~12%; +10% dias muito úmidos; +5% dias chuvas intensas; +21% períodos secos	Maior variabilidade e extremos mais intensos
Pampa	Histórico	Mínimas: +1,7 °C por século e Máximas: -0,6 °C por século (1913 e 2006)	Precipitação no Verão: +93 mm/século (1913 a 2006);	Secas repentinas curtas e baixas, Eventos extremos El Niño/La Niña
	Projeção	+0,8-1,1 °C (cenário de >1,5 °C); +1,3-1,6 °C (cenário de >2 °C)	Precipitação no Verão: +93 mm/século (1913 a 2006); Precipitação máxima 5 dias +7,7% (cenário de >1,5 °C) a +16,6% (cenário de >3 °C); Déficit hídrico até 258 mm (cenário de >2,0°C); Chuvas mais intensas/concentradas	Aumento intensidade e concentração das chuvas
Pantanal	Histórico	+0,76 °C/década (1990-2020); Média anual 25,0 → 25,6 °C; Evapotranspiração 1.839 → 1.885 mm/ano; Déficit pressão de vapor 1,31 1,38 kPa (2001-2021)	Norte do bioma: + 13% dias sem chuva; redução da precipitação de até 32% nas chuvas (2019-2020); Massa água disponível -16%; Superfície água anual 956 → 381 mil ha	Ciclos úmidos/secos; Quatro grandes secas 1993-1994, 2013-2014, 2019-2020, 2023-2024; Seca 2019-2020 inédita;
	Projeção	Até +7 °C (2100)	Redução até -30% (2100)	Intensificação déficits hídricos e eventos extremos

Fonte: Elaborado pelos autores. Referências estão no texto.

Impactos Críticos das Mudanças Climáticas e de Uso da Terra: Implicações para o Alcance da Agenda 2030

Estudos recentes mostram que os impactos de um mundo 1,5°C mais quente já se manifestam no Brasil, reforçando a urgência de ações integradas de mitigação e adaptação climática (Bevacqua et al., 2025). A intensificação de eventos extremos, o avanço do desmatamento, degradação da vegetação e solo, além dos crescentes incêndios florestais impõe desafios crescentes ao acesso à água e alimentos, exacerbando vulnerabilidades socioeconômicas já existentes no país (Clarke et al., 2024; Fletcher et al., 2024). Embora as taxas de desmatamento tenham diminuído e haja iniciativas de restauração promissoras (ver Quadro 2.1), o país ainda apresenta sinais de estagnação nos esforços de proteção e recuperação de ecossistemas terrestres e aquáticos. De acordo com o relatório de 2025 da Agenda 2030 (Sachs et al., 2025), o desempenho brasileiro permanece crítico no cumprimento do ODS 15, que visa proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, evidenciando a necessidade de ampliar e acelerar ações estruturantes para reverter a perda de biodiversidade e degradação ambiental. Essa estagnação compromete diretamente as ações de enfrentamento das mudanças climáticas nacionais e globais (ODS 13). Em consequência, impactos climáticos mais severos agravam problemas sociais e econômicos, como a erradicação da pobreza (ODS 1), a segurança alimentar (ODS 2), a garantia de saúde e bem-estar (ODS 3), a disponibilidade e o acesso à água potável (ODS 6), a provisão de energia limpa (ODS 7) e a redução das desigualdades (ODS 10).

Impactos sobre os ecossistemas terrestres (ODS 15)

O Brasil abriga uma das biodiversidades mais ricas do planeta, incluindo dois hotspots globais — o Cerrado e a Mata Atlântica —, além da Caatinga e da Amazônia, que concentram algumas das florestas secas e úmidas mais diversas do mundo (Zapata-Rios et al., 2021; Borma et al., 2022; Hauff, 2010). O país também possui ecossistemas frágeis, como os campos do Pampa (Roesch et al., 2009). Mudanças climáticas e alterações no uso da terra impactam biodiversidade e serviços ecossistêmicos em todos os biomas brasileiros. Na Amazônia, desmatamento e estações secas prolongadas têm alterado a composição de espécies arbóreas, especialmente no sudeste, com projeção de perda de até 58% da riqueza de espécies até 2050 e 53% ameaçadas de extinção (Esquivel-Muelbert et al., 2019; Gomes et al., 2019). No Pampa, Caatinga e Mata Atlântica, alterações de temperatura e precipitação podem reduzir drasticamente áreas viáveis para espécies típicas, como *Vitex megapotamica* (-57,5%) e *Campomanesia xanthocarpa* (-52,4%) no Pampa, e *Cecropia glaziovii* (-86,6%) na Mata Atlântica (Da Silva et al., 2022; Almeida et al., 2024). O aumento da aridez, temperaturas extremas e queimadas ameaça plantas e animais, impactando severamente Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal. O megaincêndio de 2020, que matou pelo menos 17 milhões de vertebrados (Tomas et al., 2021).

A velocidade das mudanças climáticas e de uso da terra supera a capacidade de adaptação de muitas espécies, acentuando perdas de biodiversidade e funções ecossistêmicas críticas, favorecendo transições irreversíveis para estados degradados (tipping points), com retroalimentações entre aquecimento global, perda de vegetação, queimadas e alterações hidrológicas (Albert et al., 2023; Nobre et al., 2016; Hirota et al., 2021). O El Niño que atingiu o Brasil em 2023 e 2024, ampliou os riscos de queimadas, resultando em um aumento de 47% nos focos de incêndio e de 59% na área queimada (Mapbiomas, 2025). Na Mata Atlântica, mais de 85% da cobertura foi suprimida, alterando o balanço hidrológico e aumentando a erosão, com impactos no

clima regional, incluindo verões mais chuvosos e invernos secos semelhantes aos do Cerrado (Pinto & Voivodic, 2021; Solorzano et al., 2021). A Amazônia e o Cerrado se aproximam de pontos de não retorno hidroclimáticos, perdendo a capacidade de manter funções essenciais de regulação climática (Bustamante et al., 2012; Nobre et al., 2016; Hirota et al., 2021; Hofmann et al., 2021, 2023). Entre essas funções, destacam-se a reciclagem de chuva pela floresta amazônica — que sustenta até 50% das chuvas locais (Costa et al., 2021) — e o transporte de vapor d'água pelos “Rios Voadores”, cuja descarga, estimada entre 10 e 23 Gt por dia, é comparável à do rio Amazonas. Esses fluxos atmosféricos são fundamentais para a segurança hídrica de dezenas de milhões de pessoas que vivem em outros biomas, como Cerrado, Pantanal e Mata Atlântica (Arraut et al., 2012; Zemp et al., 2017; Costa et al., 2021; Bergier et al., 2018). Essa umidade aumenta a parcela da chuva na Bacia do Prata de 18–23% para 24–29% na estação chuvosa (Zemp et al. 2014).

No Pampa, a resiliência diminui, com sua contração a pequenas áreas no extremo sul e expansão limitada em regiões de Cerrado de baixa resiliência (Braga & Laurini, 2024). No Cerrado, cenários de colapso projetam redução de 84 mm/ano na evapotranspiração e aumento de 0,7 °C até 2050, com impactos concentrados no Matopiba (Rodrigues et al., 2022). Na Caatinga, desertificação, degradação do solo e aumento da aridez colocam 94% do bioma sob risco moderado a alto, comprometendo biodiversidade, água, carbono e manutenção de ecossistemas produtivos (Torres et al., 2017; da Silva et al., 2017). No Pantanal, a redução da disponibilidade de água durante a estação seca (Lázaro et al., 2020) prolonga os períodos de vazante, afetando diretamente peixes e invertebrados que desempenham papel essencial na regeneração da vegetação e no ciclo do carbono (Correa et al. 2018; Girard et al., 2025). Os impactos das mudanças climáticas se estendem às zonas costeiras da Mata Atlântica, onde aquecimento, elevação do nível do mar, erosão e acidificação oceânica intensificam perda de vegetação e ameaçam a fauna

aquática (IPCC, 2021; Ranasinghe et al., 2021, Franco et al. 2020).

Projeções indicam que, até 2050, entre 10% e 47% das florestas amazônicas poderão sofrer distúrbios que provoquem transições ecológicas e agravam a crise climática (Flores et al., 2024). Esses efeitos já transformaram Amazônia e Cerrado em fontes líquidas de carbono, emitindo 1,1 Gt CO₂ e 0,86 Gt CO₂, respectivamente (Gatti et al., 2023; Gomes et al., 2024). A capacidade de absorção de carbono na Amazônia caiu 25% em 20 anos, podendo chegar quase a zero em secas extremas, elevando o CO₂ atmosférico em até 85 ppm e a temperatura global entre 1,2 °C e 1,7 °C (Brienen et al., 2015; Albert et al., 2023). O Cerrado já é um bioma vulnerável devido à proteção limitada de seus ecossistemas naturais (apenas 7,5% em UCs e 20% em reservas legais). A expansão do agronegócio nessas áreas remanescentes, combinada com os impactos das mudanças climáticas, ameaça 397 espécies endêmicas e pode liberar até 8,5 GtCO₂e — valor superior a 2,5 vezes todas as reduções de emissões obtidas na Amazônia entre 2005 e 2013 (Strassburg et al., 2017). Ecossistemas costeiros, como manguezais, já perderam até 15% de carbono devido a secas, com emissões de até 993 t CO₂e ha⁻¹ (Gomes et al., 2021; Castro et al., 2025). No conjunto, essas transformações demonstram que mudanças climáticas e pressões antrópicas estão colocando em risco a resiliência de todos os biomas terrestres brasileiros, ameaçando a biodiversidade, serviços ecossistêmicos fundamentais para a segurança ambiental de milhões de pessoas.

Impactos na Produção Agrícola e Segurança Alimentar (ODS 2)

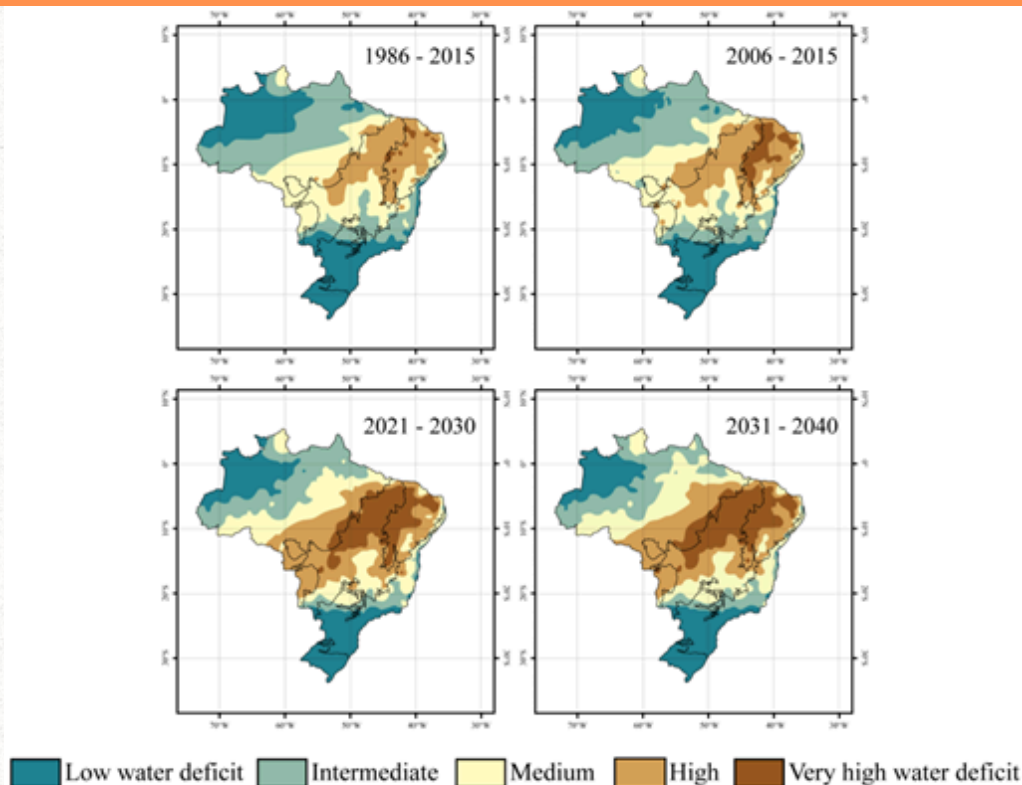
A produção agropecuária no Brasil é fortemente influenciada por temperatura, chuvas, umidade atmosférica e água no solo, fatores que podem explicar até 30% da variação da produtividade das culturas (Pereda & Alves, 2018; Assad & Assad, 2024). A agricultura empresarial representa cerca de 27,4% do PIB nacional (2021) (MAPA, 2022), enquanto a agricultura familiar é responsável por 69,6% da produção de feijão, 83% da mandioca e 45,6% do milho (2006), sendo crucial para a segurança alimentar do país (Hoffmann, 2014). Ambos os sistemas são impactados por secas severas,

geadas e variabilidade interanual das chuvas (Braga et al., 2021; Marengo et al., 2022), afetando produção, comércio e acesso aos alimentos (Assad & Assad, 2024; Borges, 2024; Santos et al., 2024; Paiva et al. 2025). Tais eventos podem esgotar economias locais e forçar a venda de bens produtivos, gerando impactos sociais e econômicos duradouros (FAO, 2016).

O aumento projetado da deficiência hídrica do solo nas próximas décadas deve agravar os impactos sobre a produtividade agrícola nacional (Figura 2.8) (Borges, 2024). A estiagem crônica iniciada em 2012 reduziu a produtividade da agropecuária — ou seja, a quantidade produzida com os recursos disponíveis — de 4,2% ao ano (1994–2011) para 1,5% (2012–2021), causando perda de 0,8 ponto percentual no PIB anual (Borges, 2024). O Cerrado é a maior área agrícola consolidada do Brasil, responsável por 12% da produção mundial de soja e 10% das exportações globais de carne bovina (Rodrigues et al., 2022). Entre os 8,1 milhões de hectares de duplo cultivo de soja e milho, 99% registraram atrasos no início da estação chuvosa; 61% tiveram redução das chuvas e 53% aumento das temperaturas máximas na primeira safra, enquanto na segunda safra 84% enfrentaram calor acima da média e 61% menor precipitação (Leite-

Filho et al., 2024). Sob cenários de aquecimento global, quedas acentuadas de produtividade de milho são previstas até o final do século (Camilo et al., 2018). Projeções indicam que a produção de soja e milho pode se deslocar gradualmente de Matopiba para regiões subtropicais do Cerrado e da Mata Atlântica (Zilli et al., 2020). No entanto, esse deslocamento terá limitações, pois cenários climáticos apontam perda significativa da aptidão agrícola no Sul do Brasil (65,7% até 2049), afetando especialmente o milho como segunda safra (Tanure et al., 2020). No Rio Grande do Sul, em março de 2020, lavouras de milho e soja tiveram perdas diretas de 21% e 16%, totalizando R\$ 4,8 bilhões (MAPA, 2022). No Pampa, meses chuvosos cada vez mais raros comprometem a subsistência e a produção de pecuaristas familiares (Rocha et al., 2021). Quedas de temperatura no inverno em 2005 e 2006 reduziram a eficiência agrícola entre 6,2% e 10%, com perdas de lucro de 13,2% devido ao frio e 30,5% devido às secas (Pereda & Alves, 2018). No sudeste da Amazônia, a aptidão agrícola pode cair até 84,9%, e a expansão de áreas cultivadas seria insuficiente para compensar as perdas de produtividade, inclusive na cana-de-açúcar, com impacto na geração de empregos e no PIB regional (Tanure et al., 2020).

Figura 2.8 - Projeção do aumento da deficiência hídrica no solo nas próximas décadas por modelos climáticos.



A combinação de alta variabilidade das chuvas, falta de irrigação, degradação do solo e pobreza rural torna o semiárido nordestino — que abriga 38% da agricultura familiar do país (Melo & Voltolini, 2019) — especialmente vulnerável aos extremos climáticos e aos impactos na segurança alimentar (Marengo et al., 2022). A seca afeta de forma crítica a produtividade agrícola e os meios de vida dos pequenos agricultores, configurando também um problema de saúde pública (Niemeyer & Vale, 2022). Entre 1981 e 2016, eventos prolongados de seca severa afetaram grandes áreas da Caatinga, com destaque para 2011–2016, quando a região enfrentou a pior seca em décadas, impactando mais de 50% do território e gerando déficit de umidade do solo de -14mm em 2014 (Getirana, 2016; Brito et al., 2018). Os efeitos sobre a agricultura foram significativos, incluindo perdas na produção de culturas essenciais, redução de pastagens e rebanhos, com impactos diretos na segurança alimentar e econômica: R\$ 3,6 bilhões na agricultura, R\$ 3,2 bilhões na pecuária e R\$ 3,2 bilhões em seguros, totalizando aproximadamente R\$ 10 bilhões (Brito et al., 2018). Na Amazônia, a seca de 2023 afetou mais de 150 mil famílias e mais de 600 mil pessoas, incluindo grupos vulneráveis como povos indígenas, populações rurais e ribeirinhas que dependem do transporte fluvial para acessar alimentos (Costa et al., 2023; Mamede et al., 2025). No Brasil, 27 milhões de habitantes urbanos enfrentam insegurança alimentar severa. Eventos extremos — como secas, ondas de calor e inundações — agravam essa situação, destruindo cultivos, interrompendo a distribuição de alimentos, comprometendo estoques e elevando os custos de armazenamento e transporte (Sotto et al., 2024).

Impactos sobre a Saúde e Segurança da População (ODS 3)

Tendências de aquecimento, fenômenos climáticos como El Niño e La Niña, secas, enchentes, ondas de calor e aumento das precipitações têm afetado a saúde pública no Brasil, ampliando a incidência de doenças infecciosas transmitidas por animais, doenças crônicas não transmissíveis e riscos

associados a desastres ambientais (Ferreira et al., 2023). A magnitude desses impactos varia conforme o grau de urbanização e degradação ambiental, o acesso a saneamento básico, as desigualdades socioeconômicas e a eficácia das políticas públicas de saúde (Ferreira et al., 2023; Marengo et al., 2023; Carvalho et al., 2025). Entre 2013 e 2024, doenças infecciosas corresponderam a 22,8% dos desastres que afetaram o território brasileiro (CNM, 2025). A propagação de zoonoses — doenças infecciosas emergentes transmitidas por animais — está relacionada a múltiplos fatores, incluindo densidade populacional, cobertura florestal, clima, práticas agrícolas e expansão urbana (Winck et al., 2022). O Brasil possui hotspots de risco para zoonoses como dengue, zika, chikungunya, oropouche, malária e febre amarela (Ferreira et al., 2023). Esses hotspots concentram-se em áreas densamente povoadas da Mata Atlântica, especialmente nos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, onde eventos climáticos extremos intensificam os surtos (Allen et al., 2017), e na Amazônia, onde a alta diversidade de mamíferos hospedeiros e a limitada disponibilidade de atendimento especializado aumentam os riscos (Winck et al., 2022). Em contraste, regiões como o Ceará, com predominância de florestas secas da Caatinga, e os estados de Goiás, Paraná e Rio Grande do Sul, abrangendo Cerrado, Mata Atlântica e Pampa, apresentam riscos relativamente menores (Winck et al., 2022). Além das zoonoses, as mudanças climáticas intensificam doenças de veiculação hídrica, frequentemente associadas a enchentes que expõem populações urbanas a águas contaminadas. Entre 2000 e 2018, 65 enchentes causaram 2.435 mortes (88% das fatalidades) e surtos de leptospirose, além de aumentar o risco de cólera (Ferreira et al., 2023). Na Amazônia, flutuações extremas do rio Amazonas elevaram a incidência de diarreia, leptospirose e dermatites (Hacon et al., 2019).

Além dos efeitos sobre a saúde, eventos climáticos extremos têm provocado perdas e danos crescentes, muitas vezes além da capacidade de adaptação de populações e instituições. Chuvas intensas causaram grandes desastres na Mata Atlântica e no

Pampa (Marengo et al., 2021b), com 3.620 alertas de desastres socioambientais concentrados em São Paulo, Belo Horizonte, Rio de Janeiro e Salvador (CEMADEN, 2024). Em 2024, o rio Acre transbordou, forçando evacuação de comunidades ribeirinhas (Serviço Geológico do Brasil, 2024), enquanto chuvas extremas no Rio Grande do Sul elevaram o rio Guaíba a 5,35m — o maior registro histórico — afetando 478 municípios e 2,4 milhões de pessoas, com 183 mortes, 27 desaparecidos, 806 feridos e mais de 15 mil casos de leptospirose (ANA, 2025) (Figura 2.9). Entre 2013 e 2024, essas chuvas causaram R\$ 215 bilhões em prejuízos no Brasil, concentrados na Região Sul (37,9%), Sudeste (23,5%) e Nordeste (22,1%), afetando infraestrutura pública e os setores agrícola, pecuário e habitacional (CNM, 2025). Eventos cada vez mais frequentes de secas severas e ondas de calor representam um risco crescente à saúde no Brasil, sobretudo nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, que abrangem os biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal (Ferreira et al., 2023). A exposição ao calor está associada ao aumento de hospitalizações por doenças cardiovasculares,

respiratórias e renais, afetando de forma desproporcional populações urbanas de baixa renda, crianças e idosos (Xu et al., 2020). Projeções de aquecimento de +4 °C indicam que mortes por estresse térmico podem crescer até 40% no Norte, 35% no Nordeste e 25% no Centro-Oeste (Ferreira et al., 2023; Castelo et al., 2025), especialmente em áreas com infraestrutura precária (Ferreira et al., 2023). No Sudeste, ondas de calor associadas às secas extremas de 2013–2015 (Soriano et al., 2016) também elevaram a mortalidade e as internações por doenças cardiovasculares, respiratórias, renais, mentais e neoplásicas, além de aumentar a incidência de partos prematuros (Ferreira et al., 2023). Os incêndios florestais, agravados por secas prolongadas e atividades ilegais, têm provocado impactos severos, devastando ecossistemas e ameaçando a saúde pública. Em escala nacional, queimadas estão associadas a aumento de 23% nas internações respiratórias e 21% nas circulatórias; na região Norte, esses índices sobem para 38% e 27%, respectivamente, devido à poluição atmosférica (Réquia et al., 2021; Paiva et al., 2025).

Figura 2.9 - Sobrevoo das áreas afetadas pelas chuvas em Canoas em 2024, grande Porto Alegre.



Foto: Ricardo Stuckert / Licença Creative Commons PR: CC BY-SA 2.0

Impactos na provisão de Água e Energia Renovável (ODS 6, ODS 7)

No Brasil, a gestão dos recursos hídricos enfrenta desafios tanto pela escassez, como no semiárido, quanto pelo excesso de demanda em grandes centros urbanos (ANA, 2014). Mudanças nos padrões de precipitação e o aumento da evapotranspiração, impulsionados pelas mudanças climáticas e pelo uso da terra, têm alterado o regime hidrológico e o fluxo de água em ecossistemas de água doce (ANA, 2024). Essas alterações afetam a disponibilidade hídrica, a qualidade da água e a geração de energia, altamente dependente de volumes expressivos de água. Atualmente, cidades, indústria e agricultura irrigada consomem 83% da água captada no país, reforçando a necessidade de políticas integradas de gestão hídrica frente aos desafios climáticos e sociais (ANA, 2024). Mudanças no uso da terra e desmatamento, combinados a efeitos climáticos, já reduziram em 19.718 m³/s a vazão média dos rios do Cerrado, podendo chegar a 23.653 m³/s até 2050 — uma perda equivalente a 33,9% da vazão regional — com impactos severos sobre agricultura, energia, biodiversidade e abastecimento (Salmona et al., 2023). A conversão de vegetação nativa e o aumento da irrigação podem reduzir em 30–40% as vazões médias e mínimas das bacias, levando à descontinuidade de rios e comprometendo a produção agrícola, a geração elétrica e o abastecimento durante a estação seca (Kolling & Souza, 2024). Secas prolongadas, chuvas irregulares, ocupação desordenada e falhas de planejamento já comprometeram os sistemas de abastecimento urbano. A seca histórica de 2014–2015 no Sudeste afetou o Sistema Cantareira e usinas hidrelétricas, evidenciando a vulnerabilidade da matriz elétrica à variabilidade hídrica e os impactos sobre o bioma da Mata Atlântica (Soriano et al., 2016). Mesmo após o aumento das chuvas, a crise hídrica persistiu até 2016, revelando a interação entre secas e eventos de excesso hídrico (Castellanos et al., 2022). Com alta densidade populacional, apenas 6% da água doce do país e elevada demanda urbana, industrial e agrícola, o Sudeste é uma das regiões mais vulneráveis (ANA, 2024). No Nordeste semiárido, dominado pela Caatinga e marcado pela pobreza rural, secas recorrentes reduzem a recarga de aquíferos,

agravada por saneamento precário e mudanças na precipitação (Hirata & Conicelli, 2012). Projeções indicam reduções severas de recarga subterrânea — até 70% nos aquíferos do Nordeste e entre 30% e 70% na região Norte até 2050. Entre 2012 e 2015, cerca de 38% da população do semiárido (9 milhões de pessoas) foi afetada pelas secas mais severas das últimas décadas, com impactos diretos sobre água, energia e segurança alimentar (Torres et al., 2017; Delazeri et al., 2018). A escassez crescente tem levado à exploração intensiva de aquíferos e poços privados, muitas vezes irregulares, aumentando o risco de estresse hídrico. As projeções indicam que os impactos climáticos não se limitam à hidrologia: alterações na radiação solar e nos padrões de vento podem afetar o potencial das fontes solar e eólica, aumentando os custos de expansão da matriz energética e exigindo investimentos adicionais entre US\$ 12 e 114 bilhões até 2100 para manter metas de descarbonização e garantir confiabilidade energética (Da Silva et al., 2021).

Governança Climática: Desafios à mitigação e adaptação climática

A agenda climática é, por natureza, transversal e requer cooperação entre União, estados e municípios, como reconhecido no Pacto pela Transformação Ecológica (Decreto nº 12.223/2024) e no Compromisso para o Federalismo Climático, formalizado pela Resolução nº 3/2024 do Conselho da Federação. Inspirada na adesão do Brasil à Coalition for High Ambition Multilevel Partnerships (CHAMP) durante a COP28, essa arquitetura busca superar a lógica centralizadora, promovendo maior integração entre políticas setoriais, fortalecimento das capacidades locais e

coordenação federativa frente aos impactos dos eventos climáticos extremos. Nesse contexto, como explicado no Quadro 2.1, o conceito de governança climática multinível vai além da articulação entre entes federativos, pressupondo a participação ativa de múltiplos atores — sociedade civil, setor privado, academia, povos indígenas, comunidades tradicionais e outros segmentos sociais — no processo de formulação, implementação e monitoramento das políticas climáticas.

O fortalecimento da governança climática

multinível e do federalismo climático constitui condição essencial para que o Brasil cumpra os compromissos assumidos no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) e operacionalize seus instrumentos nacionais. Esses arranjos institucionais e colaborativos são fundamentais para articular e coordenar a ação entre União, estados e municípios, bem como para engajar a sociedade civil, o setor privado e a academia no enfrentamento da emergência climática (conforme exemplos na Tabela 2.3).

Quadro 2.1 - Conceitos e características do Federalismo Climático e da Governança Climática

O federalismo climático é uma abordagem fundamental e urgente para articular os esforços de todos os níveis de governo no enfrentamento da crise climática (Oliveira, 2020; Grin & Abrucio, 2017). Ganhou relevância internacional pela percepção de que a execução das ações e metas climáticas ocorre sobretudo nos territórios subnacionais e consolidou-se como uma estratégia política, administrativa e jurídica essencial no contexto da complexa federação brasileira (Oliveira, 2020). Mais do que uma formulação teórica, representa uma forma de colaboração entre União, estados e municípios para formular, implementar e monitorar políticas públicas de mitigação das emissões de gases de efeito estufa e de adaptação ao cenário climático, reconhecendo a transversalidade das questões que vão do uso do solo ao planejamento urbano (Grin & Abrucio, 2017; Grin, Lotta, & Abrucio, 2023). Essa abordagem se justifica pela urgência em responder às emergências climáticas, com a definição de responsabilidades claras e a garantia de recursos adequados, previsíveis e não onerosos, assegurando que o financiamento climático não amplie o endividamento dos entes subnacionais (Oliveira, 2020).

Nesse contexto, o fortalecimento da governança climática multinível torna-se elemento central do federalismo climático, refletindo o reconhecimento de que a ação climática não se restringe mais aos governos centrais, mas se distribui por múltiplos níveis de governança, a ação climática não se restringe mais aos governos centrais, mas se distribui por múltiplos níveis de governança, impulsionada pela atuação persistente de entes subnacionais e de diferentes atores sociais (Climate Chance, 2021). Nessa perspectiva, a governança climática multinível envolve a ação articulada e estruturada de governos, sociedade civil, setor privado, academia e outras partes interessadas na agenda de enfrentamento da mudança do clima (Climate Chance, 2021). Essa cooperação se materializa tanto em instâncias formais, como conselhos e consórcios, quanto em arranjos flexíveis, baseados em redes, pactos e articulações voluntárias, que fortalecem a capacidade de resposta e a ação local, sobretudo em territórios mais vulneráveis (Grin, Lotta, & Abrucio, 2023; Climate Chance, 2021). Ao integrar diferentes esferas e setores, a governança climática amplia a legitimidade das políticas, mobiliza recursos adicionais, incorpora múltiplos saberes e reforça a capacidade do país de responder de forma coordenada, participativa e inclusiva à crise climática (Climate Chance, 2021; Grin, Lotta, & Abrucio, 2023).

A governança climática compartilha com o federalismo climático o foco na cooperação interfederativa e na necessidade de institucionalização e coordenação entre União, estados e municípios para enfrentar uma emergência que não reconhece limites administrativos (Oliveira, 2020; Grin & Abrucio, 2017). Trata-se de um processo ativo, dialogado e colaborativo, que busca superar a fragmentação típica do federalismo brasileiro, assegurando que as ações de adaptação e mitigação se enraízem nos territórios e alcancem as populações em seus contextos de vida e produção (Grin, Lotta, & Abrucio, 2023). Ambas convergem ao reconhecer que a política climática deve ser transversal, integrada entre setores, orientada por ciência e resultados, e sustentada pelo fortalecimento das capacidades subnacionais, pelo planejamento coordenado e pelo compromisso com uma transição justa (Climate Chance, 2021; Grin, Lotta, & Abrucio, 2023).

Quadro 2.1 - Conceitos e características do Federalismo Climático e da Governança Climática

Entre as características comuns ao federalismo climático e à governança climática multinível, destacam-se:

- **Priorização da agenda climática:** a mudança do clima deve ocupar posição central na pauta governamental em todos os níveis.
- **Transversalidade e integração setorial:** políticas climáticas devem ser planejadas, implementadas e monitoradas de forma integrada, articulando setores como uso da terra, transporte, indústria, resíduos e agricultura.
- **Planejamento e ação coordenada:** elaboração de planos, instrumentos e metas de forma contínua, progressiva, coordenada e participativa, com espaços formais para alinhar estratégias e respostas.
- **Fortalecimento de capacidades subnacionais:** ampliação das capacidades institucionais, técnicas e informacionais de estados e municípios, com apoio técnico e financeiro da União.
- **Protagonismo local:** reconhecimento do papel estratégico dos municípios, por estarem mais próximos dos impactos diretos e das vulnerabilidades locais.
- **Uso de evidências científicas e orientação por resultados:** decisões baseadas em ciências sustentadas por metas e indicadores que assegurem a efetividade das políticas.
- **Transição justa:** compromisso com a redução das desigualdades sociais, de gênero e de raça, promovendo equidade, inclusão e cidadania climática.
- **Participação inclusiva e multissetorial:** engajamento de diferentes atores — governos, sociedade civil, setor privado e academia — em instâncias formais e informais de governança.

Foto: Elaborado pelos autores.

Nesse contexto, a atual Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, na sigla em Inglês) do Brasil, apresentada à UNFCCC em 2024, estabelece a meta de reduzir entre 59% e 67% das emissões líquidas até 2035 em relação a 2005 e alcançar a neutralidade climática até 2050, o que é consistente, em termos absolutos, com um nível de emissões de 1,05 a 0,85 GtCO₂e, de acordo com os dados mais recentes do inventário nacional (Brasil, 2024a). Esse compromisso abrange toda a economia do país e gases de efeito estufa (GEE), estando embasado no modelo integrado Brazil Land-Use and Energy System model (BLUES) (Brasil, 2024a) e orientado pela ambição global de limitar o aquecimento a 1,5 °C (UNFCCC, 2023). O dado oficial mais recente, presente no Primeiro Relatório Bial de Transparência (BTR1), mostra que o país emitiu 2 GtCO₂e em 2022 (Brasil, 2024b). Portanto, será necessário reduzir entre 0,95 e 1,15 GtCO₂e nas emissões líquidas anuais até 2035, em relação ao valor observado em 2022, para que a meta assumida pelo Brasil seja cumprida.

Embora represente um avanço importante em relação a ciclos anteriores, a NDC

brasileira, quando comparada à linha de base de 2019 — adotada como referência global para avaliação da ambição das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) das Partes do Acordo de Paris desde o Global Stocktake (GST) finalizado na COP 28, em dezembro de 2023 — corresponde a uma redução de 39% a 50%, ficando abaixo das metas globais orientadoras definidas a partir dessa primeira rodada do mecanismo, que indicam a necessidade de reduzir as emissões em 43% até 2030 e 60% até 2035, em relação àquele ano (UNFCCC, 2023). Nesse contexto, a NDC poderia refletir com maior intensidade o elevado potencial de mitigação do Brasil, sobretudo por meio do controle do desmatamento e da transição para sistemas produtivos sustentáveis, especialmente nos setores LULUCF e agropecuária.

Embora represente um avanço importante em relação a ciclos anteriores, a NDC brasileira, quando comparada à linha de base de 2019 — adotada como referência global para avaliação da ambição das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) das Partes do Acordo de Paris desde o Global Stocktake (GST) finalizado na COP 28, em dezembro de 2023 —

corresponde a uma redução de 39% a 50%, ficando abaixo das metas globais orientadoras definidas a partir dessa primeira rodada do mecanismo, que indicam a necessidade de reduzir as emissões em 43% até 2030 e 60% até 2035, em relação àquele ano (UNFCCC, 2023).

Nesse contexto, a NDC poderia refletir com maior intensidade o elevado potencial de mitigação do Brasil, sobretudo por meio do controle do desmatamento e da transição para sistemas produtivos sustentáveis, especialmente nos setores LULUCF e agropecuária. O estudo Net Zero Brazil by 2040, em desenvolvimento, aponta que a combinação de agricultura de baixa emissão de carbono, agricultura regenerativa, reflorestamento em larga escala e recuperação de pastagens degradadas poderia antecipar a neutralidade climática do país em cerca de uma década. Os resultados preliminares indicam que os setores LULUCF e agropecuária teriam capacidade de gerar remoções líquidas de aproximadamente 1,3 GtCO₂/ano até 2040, impulsionadas pela intensificação sustentável da produção e pelo aumento do sequestro de carbono em solos e biomassa florestal.

O Plano Nacional sobre Mudança do Clima 2024–2035 (Plano Clima) passa a exercer papel central na articulação das ações de mitigação e adaptação climática em âmbito nacional, funcionando como instrumento de coordenação federativa e de fortalecimento da governança climática para o alcance das metas e compromissos assumidos pelo país em âmbito global (Brasil, 2024a, p. 10). Vinculado à Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituída pela Lei nº 12.187/2009, o Plano foi originalmente concebido como seu principal instrumento de planejamento estratégico e de médio a longo prazo. Sua versão atual — em elaboração pelo Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima (CIM) e em consulta pública, com mais de 1.300 contribuições abertas entre junho e setembro de 2024, além de plenárias regionais em todos os biomas — prevê um escopo ampliado, promovendo integração entre políticas setoriais e agendas temáticas, coordenação federativa e alinhamento com as metas de emissões líquidas do país, por meios de três pilares principais: (i) a Estratégia Nacional de Mitigação; (ii) a Estratégia Nacional de Adaptação; e (iii) a Estratégia Transversal, abordando temas comuns a ambos os eixos (Brasil, 2024c).

Tabela 2.3 - Exemplos de iniciativas de governança híbrida voltadas à mitigação e adaptação climáticas

Iniciativa	Tipo	Natureza	Escala	Principais instrumentos e mecanismos
AdaptaCidades Programa Cidades Verdes Resilientes (MMA)	Iniciativa nacional de apoio à adaptação climática urbana	Híbrida (pública com cooperação internacional e multissetorial)	Nacional (com execução estadual e municipal)	Apoio técnico a planos municipais e regionais de adaptação; capacitação; governança multinível; acesso a financiamento; integração federativa.
Estratégia PCI Produzir, Conservar e Incluir	Estratégia jurisdicional de desenvolvimento rural sustentável	Híbrida (pública Subnacional e multissetorial)	(Mato Grosso)	Governança multissetorial (CEEPCI e Instituto PCI), metas jurisdicionais de uso da terra, parcerias público-privadas, REDD+ e Carbono Neutro, captação de recursos climáticos
Pacto pela Restauração da Mata Atlântica	Coalizão multissetorial para restauração ecológica do bioma	Híbrida (sociedade civil, setor privado, poder público e instituições de pesquisa)	Bioma (17 estados do bioma Mata Atlântica)	Movimento nacional criado em 2009; meta de restaurar 15 milhões ha até 2050; mais de 300 instituições participantes; governança colegiada (Conselho de Coordenação, GTs e Unidades Regionais); protocolos técnicos de monitoramento e certificação; plataforma geoespacial para registro e acompanhamento de áreas restauradas
LEAF Coalition (Lowering Emissions by Accelerating Forest Finance)	Coalizão público-privada de financiamento climático	Híbrida (governos nacionais/subnacionais + setor privado internacional)	Internacional, com atuação em jurisdições nacionais/subnacionais	Pagamentos baseados em resultados (REDD+ jurisdicional), uso do padrão ART/TREES, critérios rígidos para compradores corporativos, envolvimento de povos indígenas e comunidades locais

Tabela 2.3 - Exemplos de iniciativas de governança híbrida voltadas à mitigação e adaptação climáticas

Iniciativa	Tipo	Natureza	Escala	Principais instrumentos e mecanismos
Programa Boina na Linha	Programa de rastreabilidade e transparência da cadeia bovina liderado pelo Imaflora	Híbrida (sociedade civil, setor privado, filantropia internacional e MPF)	Amazônia Legal	Protocolos de auditoria e monitoramento; plataforma de transparência que conecta produtores, frigoríficos, varejistas e investidores; compromissos de fornecedores quanto à origem do gado; verificação de fornecedores diretos e combate a "vazamento" e "lavagem de gado"; dados públicos e relatórios de progresso
Moratória da Soja	Acordo setorial voluntário	Privada (empresas e ONGS)	Bioma (Amazônia)	Compromisso de não comercializar soja oriunda de áreas desmatadas após 2008; monitoramento por satélite; autorregulação setorial
BRB Finance Coalition	Coalizão empresarial do setor financeiro	Privada (instituições financeiras)	Nacional e internacional	Compromisso voluntário com metas de descarbonização de carteiras; relatórios TCFD; finanças sustentáveis e risco climático
Floresta Viva 2025	Programa de financiamento e apoio técnico para restauração ecológica em todos os biomas.	Parceria público-privada liderada pelo BNDES (setor público federal) com co-financiamento e execução por organizações da sociedade civil e instituições de pesquisa.	Nacional	Fundo (BNDES Fundo Socioambiental) com aporte inicial de até R\$ 100 milhões, amplável a R\$ 250 milhões mediante parcerias. Execução via chamada pública de parceiro gestor, responsável por selecionar, contratar e acompanhar projetos. Inclui capacitação e fortalecimento institucional de pelo menos 20 associações ou coletivos de povos e comunidades tradicionais, assentados e agricultores familiares. Promove projetos de pequena e média escala voltados à restauração e ao uso sustentável da biodiversidade.

Desafios à Mitigação: Respostas às Forças Motrizes e Pressões Setoriais

A maior responsabilidade pelo cumprimento da meta de mitigação da NDC brasileira recai sobre os setores LULUCF e agropecuária, especialmente nos biomas Amazônia e Cerrado. Isso inclui a eliminação do desmatamento ilegal, a redução da supressão legal da vegetação nativa e o estímulo a modelos econômicos sustentáveis (Brasil, 2024a, 2024c), por meio do fortalecimento de ações de comando e controle e adoção e ampliação de incentivos e mecanismos financeiros, como pagamentos por serviços ambientais, linhas de financiamento verdes e programas jurisdicionais de REDD+. Para viabilizar o compromisso brasileiro, o Plano Clima 2024-2035 e a própria NDC reforçam o papel de instrumentos como os PPCDAm e do Cerrado (PPCerrado), a Estratégia Nacional de REDD+ (ENREDD+) e o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg 2025–2028) (Brasil, 2024a, 2024c). Desde 2023, medidas como a retomada do Fundo Amazônia, o uso de embargos remotos pelo IBAMA, o lançamento do programa União com Municípios e o fortalecimento do

monitoramento e da transparência ambiental reforçaram os instrumentos de comando e controle (Brasil, 2024a). Embora esses instrumentos tenham histórico de resultados expressivos — como a redução de 83% do desmatamento na Amazônia entre 2004 e 2012 —, enfrentam hoje desafios de sustentabilidade financeira, descontinuidade institucional e baixa coordenação intersetorial. O sucesso futuro dessas estratégias dependerá da capacidade de assegurar financiamento previsível, integração com políticas e planos subnacionais e engajamento contínuo dos atores privados e da sociedade civil (ver Tabelas 2.3 e 2.4).

O Plano Clima 2024-2035 também reconhece o papel dos territórios públicos e coletivos — como Unidades de Conservação e Terras Indígenas — na redução de emissões, propondo como prioridades a destinação de terras públicas, a demarcação e gestão participativa de territórios tradicionais, o fortalecimento do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), e a valorização do conhecimento dos Povos Indígenas e comunidades locais. Na Amazônia, florestas maduras com vegetação

primária e baixa degradação, manejadas historicamente por populações Indígenas, se mantiveram como importantes sumidouros de carbono entre 2001 e 2021, removendo cerca de 340 milhões de toneladas de CO₂ por ano, enquanto regiões fora desses territórios fizeram emissões líquidas de cerca de 270 milhões de toneladas por ano (World Resources Institute, 2023).

A proposta de uma agricultura agroambiental vem ganhando força, com a adoção crescente de práticas de baixa emissão de carbono e agricultura e pecuária regenerativas, baseadas no equilíbrio ambiental, redução de insumos externos e agrotóxicos, e aumento do carbono no solo, resultando em menor emissão de GEE. Novos bioinsumos também podem reduzir as emissões da pecuária. Pesquisas da Embrapa Agrobiologia indicam que o uso de leguminosas em pastagens reduz em 20% a 30% as emissões de GEE ao diminuir o uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos, promovendo a transição para uma pecuária regenerativa. O consórcio de leguminosas com gramíneas fixa nitrogênio atmosférico, melhora a fertilidade do solo, amplia a biodiversidade e favorece a circulação de nutrientes. Essas práticas

podem sequestrar até 4,4 tCO₂e/ha/ano e recuperar o carbono perdido com a mudança do uso da terra. Além disso, permitem elevar a lotação para até 2,5 cabeças de bovinos por hectare (Estevam et al., 2023).

O Cerrado brasileiro, apesar de seu papel crítico na segurança hídrica nacional e na conservação da biodiversidade, permanece altamente vulnerável ao avanço agropecuário e carece de proteção efetiva. Segundo Strassburg et al. (2017), a restauração de 6,4 milhões de hectares nesse bioma — o equivalente ao déficit de vegetação do Código Florestal — poderia evitar até 83% das extinções projetadas de espécies endêmicas, além de fortalecer a provisão de serviços ecossistêmicos e a resiliência frente à mudança do clima. Os autores defendem um cenário de desenvolvimento sustentável baseado no aumento da produtividade de pastagens, direcionamento da expansão agrícola para áreas já convertidas e implantação coordenada de políticas como PPCerrado, ENREDD+, Pagamentos por Serviços Ambientais e restauração ecológica, com apoio de instrumentos como o Fundo Amazônia e o Fundo Verde para o Clima (Quadro 2.2).

Tabela 2.4. Exemplos de Políticas Subnacionais de Mitigação Climática.

Estado	Lei ou Política	Descrição resumida
Acre (AC)	Sistema Estadual de Incentivos a Serviços Ambientais (SISA) (Lei nº 2.308 de 2010)	Institui o SISA como marco pioneiro de incentivos a serviços ambientais no Brasil, voltado a fomentar a manutenção e ampliação de serviços ecossistêmicos, como o sequestro e conservação de carbono, a regulação climática, a conservação da sociobiodiversidade, das águas, do solo e da beleza cênica, além da valorização cultural e do conhecimento tradicional. O Programa ISA Carbono tornou-se o primeiro programa de REDD+ jurisdicional do Brasil.
Amapá (AP)	Política Estadual sobre Mudanças Climáticas, Conservação e Incentivos aos Serviços Ambientais (PECISA) (Lei nº 3.128 de 2024)	A PECISA possui o objetivo geral de promover e incentivar ações de mitigação e adaptação às mudanças climáticas e de conservar os serviços ambientais no estado do Amapá.
Amazonas (AM)	Sistema Jurisdicional de REDD+ do Estado do Amazonas (Lei nº 7.432 de 2024)	Estabelece o marco estadual para o REDD+ jurisdicional, com objetivos de alcançar a neutralidade de carbono, erradicar o desmatamento ilegal, restaurar áreas degradadas e preservar os estoques florestais de carbono. Promove a transição para uma economia de baixas emissões, fortalecendo cadeias sustentáveis e a bioeconomia, com repartição justa de benefícios e valorização dos ativos ambientais do estado. O sistema se orienta por princípios de transparência, integridade, justiça climática, salvaguardas socioambientais e respeito aos direitos de povos indígenas e comunidades tradicionais.
Bahia (BA)	Programa Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais - PEPISA (Lei nº 13.223 de 2015)	Sistema público de PSA que prevê pagamentos monetários ou incentivos condicionados pela prestação de serviços ambientais. Visa valorizar economicamente os serviços ecossistêmicos, promover sua conservação e fortalecer a interação entre provedores, pagadores e mediadores. É direcionado prioritariamente a agricultores familiares e povos e comunidades tradicionais, incluindo ações de certificação, assistência técnica e educação ambiental, sob coordenação da Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SEMA/BA).

Tabela 2.4. Exemplos de Políticas Subnacionais de Mitigação Climática.

Estado	Lei ou Política	Descrição resumida
Ceará (CE)	Política Estadual sobre Pagamento por Serviços Ambientais (Lei nº 18.427 de 2023)	Institui o marco estadual de PSA voltado à manutenção e valorização dos serviços ambientais dos biomas cearenses. Busca criar instrumentos econômico-financeiros para conservação e mitigação climática, fortalecer a agricultura familiar e comunidades tradicionais, e integrar políticas estaduais e municipais de desenvolvimento sustentável. Prevê ações de capacitação, valoração de ativos ambientais, criação de corredores ecológicos e redução da pobreza em áreas provedoras de serviços ambientais.
Espírito Santo (ES)	Programa Capixaba de Mudanças Climáticas (PCMC)	Coordena políticas e ações estaduais voltadas à mitigação e adaptação climática, promovendo a redução das emissões de GEE e o aumento da resiliência da população capixaba. Integra órgãos da administração estadual em mais de 70 projetos e ações — incluindo iniciativas estratégicas - voltadas à transição para um modelo de desenvolvimento sustentável, resiliente e de baixo carbono.
Goiás (GO)	Estratégia Goiás Carbono Neutro 2050	Define a meta estadual de neutralidade de carbono até 2050, promovendo uma matriz produtiva tecnologicamente sofisticada, ambientalmente limpa e economicamente competitiva. Busca integrar esforços públicos e privados para o desenvolvimento sustentável, conservação dos biomas e resiliência hídrica, por meio de gestão jurisdicional, elaboração de Plano de Ação Climática e estímulo a práticas e tecnologias de baixo carbono, conservação florestal e participação nos mercados de carbono.
Mato Grosso (MT)	Sistema Estadual de REDD+ (Lei nº 9.878 de 2013)	Estabelece base legal e institucional para o REDD+ jurisdicional no Estado, com o objetivo de promover a redução progressiva, consistente e sustentada das emissões de gases de efeito estufa decorrentes de desmatamento e degradação florestal, bem como a conservação, o manejo florestal sustentável e a manutenção e aumento dos estoques de carbono florestal, com vistas ao alcance das metas do Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento e Queimadas do Estado de Mato Grosso, da Política Estadual de Mudanças Climáticas e da Política Nacional de Mudança do Clima e demais legislação pertinente. Integra-se à Estratégia Produzir, Conservar e Incluir (PCI).
São Paulo (SP)	Plano de Ação Climática - PAC 2050	Plano de desenvolvimento de baixo carbono que visa a neutralidade de emissões até 2050, alinhado à campanha global Race to Zero. Baseia-se em transformações estruturais na infraestrutura, tecnologias e comportamentos sociais, integrando ações setoriais e transversais em energia, transporte, uso do solo e inovação. Promove crescimento econômico competitivo, reformas institucionais e disseminação de novos modelos de negócios e financiamento climático.
Rio Grande do Sul (RS)	ProClima 2050: Estratégias de Enfrentamento das Mudanças Climáticas	Plano estadual de mitigação e adaptação climática que define estratégias para alcançar a neutralidade de emissões até 2050. Estruturado em eixos setoriais, promove a descarbonização da economia gaúcha, o fortalecimento da governança climática e a resiliência de ecossistemas e comunidades. Integra ações em energia, agropecuária, uso do solo e gestão de riscos, articulando políticas públicas e instrumentos financeiros para a transição rumo a um modelo sustentável e de baixo carbono.
Tocantins (TO)	Política Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais - PEPSA (Lei nº 4.111 de 2023)	A Política Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais (PEPSA) estabelece diretrizes para implementação do PSA no estado, orientando a atuação do poder público, sociedade civil e setor privado na manutenção, recuperação e melhoria dos serviços ecossistêmicos. Valoriza econômica, social e culturalmente esses serviços, contribuindo para a regulação do clima, a redução de emissões de GEE por desmatamento e degradação, e a promoção de alternativas econômicas sustentáveis para os provedores de serviços ambientais.

Para enfrentar o risco de vazamento de emissões para regiões com menor fiscalização, o que pode comprometer os resultados nacionais de mitigação (Moffette & Gibbs, 2021), o governo federal elaborou planos de prevenção e controle do desmatamento para os outros biomas — Caatinga, Pantanal, Mata Atlântica e Pampa — superando a abordagem fragmentada anterior. A efetividade desses planos depende da superação de desafios como a ausência de orçamento vinculado, a baixa articulação entre sistemas de informação e a

fragilidade de instrumentos de rastreabilidade e fomento territorial. Requer-se também uma governança climática capaz de integrar União, estados e municípios, respeitando competências constitucionais (CF 1988, arts. 23, 24 e 30; LC 140/2011), e articulando estratégias entre biomas com diferentes características ecológicas, econômicas e sociais (Brasil, 2024c). Dada a estrutura federativa do Brasil, as ações dos entes subnacionais — estados, Distrito Federal e municípios — serão fundamentais para o alcance das metas estabelecidas

para 2035 (Brasil, 2024a).

A regeneração natural da Caatinga sobre áreas degradadas incrementa significativamente os estoques de carbono orgânico, nitrogênio e fósforo no solo. Após 35 anos, esses estoques aumentam em cerca de 115% (SOC), 110% (N) e 117% (P) em comparação à pastagem degradada. Ainda assim, os valores absolutos permanecem baixos, o que ressalta a necessidade de estratégias de restauração e manejo adicional para recuperar a fertilidade plenamente (Silva et al., 2024). Essas ações são mais eficazes quando planejadas em nível paisagístico e considerando múltiplas dimensões simultaneamente (Antongiovanni et al., 2022). No Pantanal, a mitigação climática depende do controle de incêndios florestais, da restauração de áreas degradadas e da adoção de práticas

produtivas sustentáveis. Entre as estratégias destacam-se o fortalecimento do manejo integrado do fogo, a capacitação de brigadas locais, a recuperação de margens de rios e áreas de vegetação nativa e o manejo sustentável de pastagens nas zonas de amortecimento, ações que contribuem para conservar a integridade ecológica do bioma e reduzir emissões associadas à conversão de áreas naturais (Ribeiro & Pereira, 2023). No Pampa, sistemas de pecuária com pastagens naturais e baixa lotação, frequentemente com manejo rotativo, conservam a vegetação nativa, evitam degradação do solo e promovem sequestro de carbono no solo — com absorção líquida média anual de 207 gC m⁻² em estudos recentes. Esse manejo regenerativo preserva biodiversidade e potencial de retenção de carbono superior ao da biomassa aérea (Roberti et al., 2024).

Quadro 2.2 - A restauração da vegetação nativa como elemento central para mitigação e adaptação climática no Brasil

A restauração da vegetação nativa é tratada pelo Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg 2025–2028) como uma das principais estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas no Brasil. A meta nacional reafirmada no documento é recuperar 12 milhões de hectares até 2030, com foco na conversão de áreas degradadas, especialmente pastagens de baixa aptidão agrícola, para sistemas sustentáveis como Sistemas Agroflorestais (SAFs), Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e Silvicultura de Espécies Nativas. O plano reconhece a restauração como solução baseada na natureza de alto custo-efetividade, com impactos positivos diretos sobre a resiliência dos ecossistemas e dos territórios, sendo valorizada tanto pelo seu potencial de remoção de carbono e geração de empregos quanto pela sua contribuição à segurança hídrica, à redução de riscos climáticos e à proteção da biodiversidade (Brasil, 2024d). Para viabilizar sua implementação em grande escala, são propostas estratégias como o fortalecimento da governança federativa, a criação de incentivos financeiros e legais, o apoio à inovação tecnológica e à cadeia de sementes e mudas nativas, bem como o engajamento de múltiplos atores — desde agricultores familiares até grandes produtores, Povos Indígenas, comunidades tradicionais e assentados da reforma agrária. Também estão previstas ações em áreas públicas, incluindo Unidades de Conservação e Terras Indígenas, por meio de instrumentos como projetos de recuperação ecológica. Apesar desses avanços, o plano reconhece desafios estruturais, como a baixa articulação institucional, a insegurança jurídica e a limitação de financiamento de longo prazo, que ainda dificultam a expansão da restauração como eixo estruturante da transição para uma economia de baixo carbono no Brasil (Brasil, 2024d).

A restauração florestal em escala no Brasil deve ser compreendida como um conjunto de práticas integradas que inclui não apenas ações de recomposição ecológica com espécies nativas, mas também estratégias de recuperação de áreas degradadas e regeneração natural com diferentes finalidades. O conceito de restauração abrange múltiplas abordagens — como regeneração natural, plantio ativo, SAFs, ILPF e silvicultura de nativas — mas a fragmentação normativa ainda dificulta sua aplicação combinada. A implementação em grande escala requer a integração entre áreas públicas e privadas, com destaque para terras públicas na Amazônia, que demandam modelos contratuais inovadores e fortalecimento da governança fundiária. Também é necessário superar barreiras à articulação entre restauração obrigatória e voluntária, incluindo entraves regulatórios e econômicos. A consolidação de marcos regulatórios, o fortalecimento da coordenação institucional e a mobilização de instrumentos financeiros —

Quadro 2.2 - A restauração da vegetação nativa como elemento central para mitigação e adaptação climática no Brasil

como o mercado de carbono e os pagamentos por serviços ambientais — são condições essenciais para viabilizar a restauração como eixo da transição ecológica no país (Lopes & Chiavari, 2024).

Estudo recente de Dutra et al. (2024) reforça o papel central da restauração florestal para a mitigação das emissões e aponta que o Brasil possui cerca de 16 milhões de hectares de áreas de Reserva Legal a serem restauradas, concentradas principalmente na Amazônia (59%), Cerrado (25%) e Mata Atlântica (14,5%). Adicionalmente, o país conta com aproximadamente 37,5 milhões de hectares de pastagens severamente degradadas, com alta concentração também nesses três biomas. O custo estimado para restaurar os 12 milhões de hectares previstos no Planaveg varia entre US\$ 9,1 e US\$ 15,5 bilhões no total. Os autores destacam que a regeneração natural apresenta melhor relação custo-benefício e maior sucesso ecológico do que métodos convencionais de plantio, sendo, portanto, uma estratégia prioritária para alcançar escala e efetividade climática na restauração florestal no Brasil.

O Arco da Restauração é uma iniciativa do governo federal, coordenada pelo Ministério do Meio Ambiente, ICMBio e BNDES, que visa recuperar 6 milhões de hectares de áreas degradadas até 2030 na região do Arco do Desmatamento, onde a Amazônia sofre maiores pressões de desmatamento. Financiado pelo Fundo Amazônia, o programa busca transformar essa faixa crítica em um cinturão verde de proteção e restauração, promovendo benefícios ambientais, sociais e econômicos para as comunidades locais. Sua principal ação é o Restaura Amazônia, lançado em 2024, com R\$ 450 milhões destinados à restauração de Unidades de Conservação, Terras Indígenas, Áreas de Preservação Permanente e Reservas Legais, em alinhamento ao Planaveg e à meta nacional de restaurar 12 milhões de hectares.

De acordo com estudo de Brancalion et al. (2022), o Brasil pode gerar entre 1 e 2,5 milhões de empregos diretos até 2030 com a restauração de 12 milhões de hectares, conforme previsto no Planaveg, considerando uma média de 42 postos de trabalho a cada 100 hectares restaurados por plantio de mudas e sementes. Além de seus benefícios ambientais de longo prazo, a restauração ecológica representa uma oportunidade concreta e imediata de desenvolvimento socioeconômico, sobretudo em áreas rurais e vulneráveis. A cadeia produtiva da restauração, composta por viveiros, coletoras de sementes, cooperativas e pequenas empresas, já emprega milhares de pessoas, mas permanece altamente dependente de políticas públicas e financiamento estável. Os autores reforçam que o cumprimento do Código Florestal, aliado a incentivos econômicos regionais, pode transformar a restauração em um setor estratégico para a transição ecológica com justiça social.

Na Mata Atlântica, a recuperação de áreas degradadas e a implementação do Código Florestal, com foco na regularização de APPs e RLs, são estratégias prioritárias para a mitigação climática e a restauração de serviços ecossistêmicos (Dutra et al., 2024). A restauração ecológica orientada por conectividade e estoques de carbono apresenta alta relação custo-benefício e recupera funções como regulação hídrica e climática. Estratégias espacialmente otimizadas podem triplicar os ganhos de conservação e reduzir os custos pela metade, quando comparadas a abordagens não planejadas (Strassburg et al., 2019; Niemeyer et al., 2019). Agroecologia, sistemas agroflorestais e silvicultura com espécies nativas conciliam conservação, segurança alimentar e renda em pequenas

propriedades inseridas na restauração da Mata Atlântica (Shennan-Farpón et al., 2022). Ferramentas de inteligência espacial e cenários de política (como PSA e mercados de carbono) modelados por meio de abordagens espaciais indicam que metas de restauração — como 15 Mha até 2050 — podem ser alcançáveis com arranjos institucionais articulados (Shennan-Farpón et al., 2024). A meta de restaurar 15 Mha até 2050, promovida pela Aliança pela Restauração da Mata Atlântica, demanda integração entre políticas ambientais, agrícolas, climáticas e de emprego verde — ilustrada por estudos de acordo com o cenário de recuperação legal e restauração das APPs (Rezende et al., 2018).

Embora o setor de uso da terra concentre a maior parcela do potencial de mitigação, o

cumprimento integral da NDC brasileira exige sinergias com outros setores emissores, especialmente o energético e o urbano. O Plano Clima 2024–2035 propõe estratégias para descarbonizar a matriz elétrica, ampliar o uso de biocombustíveis e hidrogênio verde, promover a eficiência energética e reduzir emissões no transporte e nos centros urbanos, que concentram cerca de 85% da população e uma parcela crescente das emissões nacionais. O Brasil, cuja matriz depende majoritariamente da geração hidrelétrica, está particularmente exposto aos impactos climáticos sobre os recursos renováveis. Estudos indicam que considerar apenas a variabilidade hídrica subestima os custos e riscos da expansão energética, já que alterações no potencial solar e eólico também afetam a confiabilidade do sistema. As projeções apontam que o país deverá responder por parcela relevante dos investimentos adicionais estimados entre US\$ 12 e 114 bilhões na região até 2100, reforçando a necessidade de diversificar a matriz com fontes como solar, eólica e biomassa, e planejar a expansão elétrica com base em critérios de resiliência climática (Sando da Silva et al., 2021).

Desafios à Adaptação: Respostas aos Impactos

A adaptação climática avança lentamente no Brasil, apesar de sua institucionalização desde 2016 com o Plano Nacional de Adaptação (PNA), vinculado à Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei nº 12.187/2009) (Brasil, 2016). Estruturado de forma intersetorial e multiescalar, o PNA trouxe avanços como a criação do CEMADEN, o aprimoramento dos cenários climáticos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a plataforma AdaptaBrasil do Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação. A experiência do PNA 2016 revelou avanços institucionais, mas também fragilidades na governança da adaptação. Apesar de ter promovido diagnósticos intersetoriais e diretrizes temáticas, o plano careceu de metas orçamentárias e de um sistema efetivo de monitoramento e coordenação federativa. Sua execução foi prejudicada pela descontinuidade administrativa, ausência de orçamento vinculado e fragmentação de responsabilidades entre ministérios e estados

(WRI Brasil, 2024). Esses fatores limitaram a transição do plano de um instrumento diagnóstico para uma política de implementação efetiva.

A urgência da adaptação ganhou destaque em 2023, diante da intensificação de eventos climáticos extremos no Sul e no Norte do país. A NDC de 2024 foi a primeira a incluir expressamente esse tema e a nova Estratégia Nacional de Adaptação (ENA), que integrará o Plano Clima 2024–2035, busca corrigir as fragilidades do PNA ao prever metas e indicadores setoriais/temáticos, arranjos de governança e integração com planos subnacionais (Lei nº 14.904/2024), com monitoramento e avaliação coordenados pelo CIM/GTA. A ENA propõe diretrizes voltadas à justiça climática, proteção ambiental e fortalecimento institucional, com planos setoriais para 16 áreas — entre elas agropecuária, energia, biodiversidade e Povos Indígenas. A biodiversidade brasileira, a mais rica do mundo, é considerada um eixo central dessa estratégia, pois a elevação das temperaturas, a alteração dos regimes de chuvas e a intensificação de eventos extremos reduzem a resiliência dos ecossistemas e comprometem serviços ecossistêmicos essenciais — como polinização, dispersão de sementes e regulação hídrica — dos quais dependem setores produtivos e modos de vida tradicionais. Diante disso, a ENA articula-se à Estratégia e Planos de Ação Nacionais para a Biodiversidade (EPANB) e ao Marco Global de Kunming-Montreal, priorizando três objetivos temáticos: conservação de espécies ameaçadas, manutenção da resiliência dos ecossistemas e incremento da conectividade ecológica (Brasil, 2024e).

A adaptação climática é estratégica para a resiliência do setor agropecuário brasileiro, essencial à economia, sociedade e meio ambiente. As perdas com a seca de 2021/2022, sobretudo no Sul, Sudeste e Centro-Oeste, evidenciam a urgência de fortalecer instrumentos como seguro rural e vigilância sanitária. O seguro rural — ao indenizar perdas decorrentes de eventos climáticos extremos, reduzir a vulnerabilidade econômica e viabilizar a adoção de tecnologias mais resilientes — é reconhecido como um instrumento-chave de adaptação climática. No entanto, sua implementação ainda enfrenta desafios relevantes, como

baixa cobertura geográfica e setorial, custo elevado mesmo com subsídio, pouca penetração em sistemas produtivos diversificados e limitada integração com políticas climáticas mais amplas. Também são prioritários o manejo sustentável da água e da biodiversidade, além da proteção de Reservas Legais e Áreas de Preservação Permanentes, fundamentais para serviços ecossistêmicos como polinização e controle de pragas. A adaptação deve promover justiça climática, com foco em pequenos agricultores, mulheres e comunidades tradicionais. Ao integrar o Plano de Adaptação e Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (ABC+) à Estratégia Nacional de Adaptação, o país visa proteger sua segurança alimentar, base produtiva e meios de vida rurais diante dos riscos climáticos crescentes (Brasil, 2024e).

Embora tenha pouca participação nas emissões do setor agropecuário, a agricultura familiar é altamente vulnerável aos impactos das mudanças climáticas, especialmente em regiões com baixa capacidade adaptativa, como o semiárido. Perdas produtivas, insegurança hídrica e infraestrutura precária são recorrentes entre agricultores familiares mais frágeis (Obermaier & Rosa, 2013; Brasil, 2024f). Estratégias de adaptação com enfoque em justiça climática são essenciais para garantir que mulheres e grupos marginalizados tenham acesso equitativo a políticas, tecnologias e financiamento (Brousseau et al., 2024). A agroecologia, destacada em diretrizes globais como a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2023) e relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022), fortalece a resiliência, assegura o direito à alimentação e apoia compromissos internacionais. Para alcançar escala, é necessário estruturar políticas públicas integradas com apoio técnico-financeiro, inclusão produtiva e coordenação territorial (Lucena et al., 2018).

A assistência técnica e extensão rural (ATER) atuou como importante facilitador da adaptação climática nos biomas brasileiros,

apoiando práticas de convivência resiliente ao semiárido. Na Caatinga, o Projeto Rural Sustentável Caatinga promoveu a implantação de Tecnologias Agrícolas de Baixo Carbono (TecABC), integrando ATER e cooperativas locais (Mattos et al., 2024). Já o Programa Dom Hélder Câmara II (PDHC II) demonstrou que ATER, quando associada a apoio financeiro, melhora a capacidade de resposta à seca, reduz pobreza e fortalece experiências de agricultura sustentável (Delgrossi et al., 2024).

As estratégias de adaptação climática no Brasil têm considerado as especificidades ecológicas, sociais e econômicas de cada bioma, reconhecendo que os impactos das mudanças climáticas— como eventos extremos, perda de biodiversidade e insegurança hídrica — afetam territórios e populações de forma desigual (Tabela 2.5). Em 2024, o arcabouço institucional foi ampliado com marcos importantes, como a Lei nº 14.904/2024, que exige planos de adaptação em todas as esferas federativas, integrando políticas setoriais, avaliação de riscos e participação social, e o Programa Cidades Verdes Resilientes (Decreto nº 12.041/2024), voltado à integração entre políticas urbanas e climáticas e à valorização de serviços ecossistêmicos urbanos. Apesar dos avanços, persistem lacunas críticas: maioria das políticas de adaptação carece de metas quantificadas, indicadores de risco e mecanismos robustos de financiamento e monitoramento (WRI Brasil, 2025). A baixa articulação interfederativa e a limitada capacidade técnica local dificultam a implementação em escala. Nesse cenário, a transversalização da adaptação em políticas de desenvolvimento e planos setoriais representa uma diretriz estratégica, capaz de gerar sinergias e ganhos de escala. A efetividade da Estratégia Nacional de Adaptação do Clima dependerá da consolidação de instrumentos de governança, responsabilização e financiamento que garantam sua execução integrada e contínua.

Tabela 2.5 - Focos e políticas para adaptação climática nos biomas brasileiros

Região / Bioma	Principais focos e políticas para adaptação climática
Amazônia	<p>A adaptação climática na Amazônia envolve práticas como manejo florestal sustentável, restauração ecológica e sistemas agroflorestais resilientes, reforçando a resiliência das comunidades tradicionais a eventos extremos como seca e incêndios (Gastauer et al., 2020; Wright et al., 2014). Planos como o PPCDAm, Planaveg e ENREDD+ desempenham papel estratégico ao integrar segurança climática com segurança hídrica, alimentar e territorial (Brasil, 2024a). A restauração florestal representa uma medida altamente eficaz para garantir serviços ambientais, incluindo regulação do ciclo hidrológico e conservação da biodiversidade (Strassburg et al., 2020).</p>
Cerrado	<p>A degradação do Cerrado causada por queimadas e eventos extremos tem sido enfrentada com manejo integrado do fogo, restauração ecológica e ações voltadas à regulação hídrica (Klink et al., 2020; Schmidt et al., 2018). Essas práticas promovem serviços ecossistêmicos essenciais, especialmente para a segurança hídrica e a mitigação de incêndios em paisagens agrícolas e nas zonas de recarga (Klink et al., 2020). Programas oficiais como PPCerrado e Planaveg ainda são centrais para estruturar a resiliência climática no bioma.</p>
Caatinga	<p>Na Caatinga, a adaptação climática tem priorizado a restauração de áreas degradadas com foco na conectividade, biodiversidade e resiliência ecológica (Antongiovanni et al., 2022). A regeneração natural da vegetação nativa em áreas degradadas tem sido apontada como uma estratégia eficaz para recuperar estoques de carbono, nitrogênio e fósforo no solo, contribuindo para aumentar a resiliência ecológica e recuperar a fertilidade (Silva et al., 2024). Estudos também destacam que práticas agroecológicas combinadas com diversificação produtiva, bem como o uso de sistemas agroflorestais adaptados ao semiárido, podem melhorar a segurança hídrica e a sustentabilidade produtiva (Oresca et al., 2024). A adaptação baseada em ecossistemas (EBA) na Caatinga é uma estratégia custo-efetiva, mas sua efetividade depende da superação de obstáculos institucionais e da integração com o paradigma da Convivência com o Semiárido, valorizando práticas sustentáveis e saberes locais (Niemeyer & Vale, 2022.)</p>
Mata Atlântica	<p>Na Mata Atlântica, a adaptação climática está fortemente relacionada à restauração ecológica, à gestão territorial integrada e à proteção de florestas secundárias. Medidas como a recuperação de áreas degradadas com base em critérios de conectividade ecológica e resiliência climática têm sido consideradas fundamentais para enfrentar a perda de serviços ecossistêmicos, como regulação hídrica e contenção de desastres (Strassburg et al., 2019). Políticas públicas voltadas à agricultura familiar, como o PRONAF Parcelamento Verde e iniciativas estaduais de restauração, são cruciais para aumentar a capacidade adaptativa de pequenos produtores, fortalecer a segurança alimentar e promover práticas sustentáveis em regiões fragmentadas como a Mata Atlântica (Shennan-Farpon et al., 2022).</p>
Pampa	<p>No bioma Pampa, a adaptação climática depende fortemente da conservação dos campos nativos e da adoção de práticas de manejo sustentável. A valorização do saber local e o estímulo a políticas de governança territorial participativa são considerados pilares importantes para fortalecer a resiliência das comunidades frente às mudanças climáticas (Roberti et al., 2024). O bioma Pampa brasileiro enfrenta pressões significativas de uso intensivo da terra e invasão de espécies exóticas, o que compromete seus estoques de carbono, biodiversidade e serviços ecossistêmicos. Estudos recentes ressaltam o potencial dos sistemas de manejo de pastagens nativas e de restauração ecológica para promover práticas agrícolas sustentáveis e fortalecer a conservação regional (Michel & Overbeck, 2024). A literatura também destaca o papel do sensoriamento remoto como ferramenta essencial para mapear a dinâmica da paisagem, monitorar fragmentação e contribuir para ações estratégicas de restauração e manejo de pastagens (da Rocha et al., 2023).</p>
Pantanal	<p>No Pantanal, a adaptação climática exige práticas integradas que combinem governança hídrica, restauração de áreas degradadas e manejo sustentável de pastagens naturais. Estratégias como o Manejo Integrado do Fogo (IFM) e a restauração natural de vegetação sensível são fundamentais para lidar com os ciclos cada vez mais irregulares de cheia e seca (Martins et al., 2022). Além disso, a formação de brigadas comunitárias, o uso de tecnologia de monitoramento climático (como o aplicativo Sigma) e a valorização do conhecimento tradicional têm fortalecido a resiliência territorial, especialmente diante de incêndios recorrentes e perda de biodiversidade (UNESCO, 2023). Por fim, o monitoramento participativo e a capacitação das comunidades locais também surgem como instrumentos prioritários para a tomada de decisões climáticas adaptativas (Chiaravalloti et al., 2021).</p>

Financiamento Climático

O financiamento climático no Brasil ainda está em consolidação e enfrenta desafios significativos para alcançar a escala necessária à transição justa e resiliente. Estima-se que o país demandará até R\$ 1 trilhão até 2030 apenas para cumprir suas metas de mitigação, a depender das trajetórias escolhidas, além de volumes expressivos para ações de adaptação, cujos custos permanecem subdimensionados. Enquanto os setores de energia e transporte já atraem maior volume de recursos privados e instrumentos financeiros, com destaque para o crescimento de mercados de capitais e investimentos corporativos, a adaptação segue subfinanciada e fragmentada. Em 2024, por exemplo, o Fundo Clima destinou apenas R\$ 3,9 milhões para adaptação, evidenciando sua baixa prioridade institucional mesmo diante da crescente vulnerabilidade de regiões como o semiárido e as zonas costeiras. A ausência de uma estratégia nacional clara, a baixa articulação entre políticas públicas e instrumentos financeiros e a fraca mobilização de atores privados limitam o uso de mecanismos inovadores, como o blended finance, no campo da adaptação. Já a mitigação tem contado com fontes mais estruturadas, como o Fundo Amazônia, linhas do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), títulos verdes e a futura regulação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), além da atuação de programas como o PPCDAm, PPCerrado, Planaveg e iniciativas jurisdicionais de REDD+, que têm contribuído para estruturar parte do ecossistema nacional de financiamento climático (Instituto Talanoa, 2024).

Strassburg et al. (2017) enfatizam que políticas climáticas consolidadas — como a Estratégia Nacional de REDD+ (ENREDD+), o Plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono) e o Fundo Amazônia — poderiam ser estendidas ao Cerrado para criar incentivos financeiros diretos à conservação e restauração. Essa ampliação não apenas corrigiria desigualdades na distribuição de recursos entre biomas, mas também potencializaria benefícios como segurança hídrica, mitigação de emissões e proteção da biodiversidade. Integrar esses instrumentos na lógica de pagamentos por

resultados no Cerrado representa uma estratégia essencial para fortalecer a governança climática e impulsionar o desenvolvimento sustentável em regiões com grande valor ecológico e desafios institucionais.

Entre 2021 e 2023, o financiamento climático voltado ao uso da terra no Brasil totalizou aproximadamente R\$ 18,3 bilhões, com predominância de recursos públicos e foco majoritário em ações de mitigação (65%). A maior parte desse montante foi destinada à agricultura de baixo carbono, conservação e restauração florestal, com destaque para instrumentos como o crédito rural do Programa ABC+, que respondeu por mais da metade dos recursos. Apesar do volume expressivo, persistem desafios relacionados à rastreabilidade e à transparência dos critérios climáticos adotados, o que limita a avaliação da efetividade dos investimentos. As ações de adaptação ainda são pouco priorizadas, especialmente no que se refere ao apoio estruturante à resiliência de sistemas produtivos e ecossistemas. Para ampliar o impacto do financiamento climático, recomenda-se o fortalecimento de mecanismos como fundos garantidores, blended finance e pagamento por resultados, além da consolidação de marcos regulatórios e de governança que assegurem coordenação intersetorial e territorial (CPI, 2024).

A NDC brasileira de 2024, conforme exemplificado na Tabela 2.6, apresenta instrumentos financeiros — em diferentes estágios de operacionalização — como essenciais à implementação das ações de mitigação e adaptação, incluindo fundos públicos, linhas de crédito, mecanismos de mercado e reformas estruturais (Brasil, 2024a). Apesar de avanços como os títulos sustentáveis e o programa Eco Invest Brasil, persistem desafios como a falta de coordenação institucional, a ausência de uma taxonomia sustentável implementada, a baixa mobilização do setor privado para adaptação e a escassez de projetos bancáveis, isto é, projetos estruturados de forma a serem viáveis técnica, econômica e financeiramente, atendendo aos critérios exigidos por financiadores públicos e privados. Para superá-los, recomenda-se articular capital público e privado via blended finance, fortalecer a governança climática e alinhar o Plano Clima e a NDC aos fluxos financeiros

disponíveis. A mobilização efetiva do financiamento climático no país exige ambiente regulatório estável, inovação

financeira e priorização clara de ações com foco na resiliência das populações mais vulneráveis (Instituto Talanoa, 2024).

Tabela 2.6 - Instrumentos de Financiamento Climático indicados na NDC brasileira de 2024

Instrumento	Status	Descrição	Papel climático
Fundo Clima	Operacional	Fundo público federal, criado pela Lei nº 12.114/2009, vinculado ao Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, com recursos reembolsáveis (via BNDES) e não reembolsáveis (via MMA).	Apoia projetos de mitigação de GEE e adaptação climática no Brasil, financiando desde inovação tecnológica a infraestrutura climática urbana.
Taxonomia Sustentável	Em construção (Carece de aprovação final)	É um sistema de classificação técnica que define quais atividades econômicas se qualificam como sustentáveis em termos ambientais, sociais e climáticos.	Visa guiar fluxos de investimento, orientar políticas públicas e assegurar a consistência dos apoios financeiros com a agenda climática nacional.
Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE)	Em construção (Carece de regulamentação)	Instituído pela Lei 15.042/2024, o SBCE institui o mercado regulado de carbono brasileiro, com fases que incluem criação de um registro central e regulamentação por setor.	Busca reduzir emissões de GEE e criar incentivos financeiros para inovações de baixo carbono.
Fundo Amazônia	Operacional	Criado em 2008, através do Decreto 6.527/2008, vinculado ao Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, e sob administração do BNDES, tem por finalidade captar doações - incluindo pagamentos por resultados de REDD+ reconhecidos pelo Brasil no âmbito da UNFCCC para investimentos não reembolsáveis.	Prevenção, monitoramento e combate ao desmatamento, e de promoção da conservação e do uso sustentável da Amazônia Legal. Também apoia o desenvolvimento de sistemas de monitoramento e controle do desmatamento no restante do Brasil e em outros países tropicais Contribui diretamente para a mitigação climática no setor LULUCF.
Plataforma Brasil de Investimentos Climáticos e para a Transformação Ecológica (BIP)	Operacional	Liderada pelo Ministério da Fazenda (MF), em conjunto com os ministérios do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA), do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), e de Minas e Energia (MME), a Plataforma apoia o Plano de Transformação Ecológica e demais planos de transição e adaptação climática do governo em setores-chave. O BNDES atua como Secretariado da Plataforma, gerindo o dia a dia das operações.	Ao identificar projetos com potencial de impacto ambiental e climático, a BIP contribui para a mobilização de capital em ações de mitigação de emissões e adaptação às mudanças climáticas, com foco em infraestrutura verde, energia limpa, uso da terra e resiliência socioambiental.
Títulos Soberanos Sustentáveis	Operacional	Títulos de dívida pública lastreados em orçamentos federais destinados exclusivamente a financiar projetos com impactos ambientais e sociais positivos, conforme critérios do arcabouço nacional, este formalizado em 5 de setembro de 2023. O primeiro título global foi emitido em 13 de novembro de 2023 (Global 2031, US\$ 2 bi), seguido do segundo em 20 de junho de 2024 (Global 2032, US\$ 2 bi).	Ao financiar iniciativas como energia renovável, conservação da biodiversidade, saneamento e adaptação urbana, esses títulos geram recursos concretos para mitigação e adaptação, com alocação de 50-60% para temas ambientais e 40-50 % para sociais.
Eco Invest Brasil	Operacional	Programa financeiro público com foco em investimento verde (MF e BNDES). Oferece linhas de crédito para mitigar riscos cambiais e viabilizar o amadurecimento de projetos, garantindo previsibilidade e redução de riscos para investimentos de longa maturação no país e linhas de crédito com recursos públicos em condições atrativas para alavancar investimentos privados, nacionais e internacionais.	O programa viabiliza projetos estratégicos para a indústria verde, recuperação de biomas, infraestrutura para lidar com os efeitos das mudanças do clima e de inovação tecnológica para a Transformação Ecológica. Os principais setores beneficiados são: Transição energética, Bioeconomia, Economia circular e Infraestrutura verde e adaptação.

Os programas jurisdicionais de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal, Manejo Florestal Sustentável e Conservação e Aumento de Estoques de Carbono Florestal (REDD+), com resultados mensurados em escala estadual ou nacional, com créditos de carbono de alta integridade, verificação externa e salvaguardas socioambientais, se destacam como o principal mecanismo atualmente operacional e escalável para viabilizar uma economia florestal baseada na conservação, regeneração e valorização da floresta em pé (Nepstad et al., 2025). Para os estados da Amazônia, representam uma oportunidade estratégica de captar financiamento climático, fortalecer a governança territorial e liderar a agenda climática. Ao seguir padrões como o ART-TREES, estados como Acre, Mato Grosso, Pará e Tocantins poderão emitir juntos até 100 milhões de créditos em 2026. Apenas as reduções de emissões de 2023 e 2024 poderiam gerar cerca de US\$1,5 bilhão, superando todo o volume histórico do Fundo Amazônia. O JREDD+ viabiliza uma estratégia federativa de mitigação e financiamento climático centrada nos estados (Nepstad et al., 2025).

O Fundo Florestas Tropicais para Sempre (TFFF) é uma proposta ambiciosa do Brasil de fundo fiduciário permanente para financiar conservação florestal com capital público e privado. O mecanismo prevê uma remuneração anual de aproximadamente US\$ 4 por hectare conservado, sujeito a penalidades para desmatamento ou degradação — além de destinar pelo menos 20% dos recursos a Povos Indígenas e comunidades locais (Global Foundation, 2024; UNDP, 2025). Estruturado como finanças híbridas, o TFFF pretende mobilizar até US\$ 125 bilhões para gerar pagamentos condicionados ao desempenho em conservação, complementando os instrumentos existentes como o REDD+. O fundo conta com apoio do G20 e do BRICS e será um modelo de pagamento por

serviços ecossistêmicos com potencial global.

A NDC brasileira de 2024 reafirma o interesse do país em participar dos mecanismos cooperativos do Artigo 6 do Acordo de Paris, incluindo a geração e transferência de Resultados de Mitigação Internacionalmente Transferíveis (ITMOs). Essa participação dependerá de autorização nacional prévia e ajustes correspondentes para assegurar integridade ambiental e evitar dupla contagem (Brasil, 2024a). A medida abre caminho para o reconhecimento de programas jurisdicionais de REDD+ como fonte legítima de ITMOs, ampliando o acesso a mercados internacionais de carbono e atraindo investimentos para conservação florestal e transição para uma economia de baixo carbono. A possibilidade de monetização via créditos verificados e uso de ITMOs tem aumentado o interesse de investidores (Instituto Talanoa, 2024).

Durante a presidência brasileira do BRICS, em julho de 2025, os líderes do bloco adotaram a Declaração de Referência sobre Financiamento Climático, estabelecendo um marco político para a construção de um sistema internacional mais justo, eficaz e acessível aos países em desenvolvimento (BRICS, 2025). O documento propõe reformas nos bancos multilaterais para mobilizar capital privado e ampliar financiamentos concessionais voltados à transição justa e à conservação florestal. Anuncia ainda uma parceria entre os países do bloco para desenvolver mercados de carbono, com foco em capacitação e intercâmbio técnico. Os líderes também rejeitaram medidas unilaterais como as taxas de carbono na fronteira e reconheceram a proposta brasileira do TFFF, reforçando a estratégia do Brasil de liderar os esforços multilaterais em financiamento climático rumo à COP30 em Belém.

Desafios para uma Governança Climática Transformadora

A implementação de uma governança climática transformadora no Brasil exige articulação intersetorial, coordenação federativa e o fortalecimento de mecanismos institucionais e participativos que assegurem coerência e efetividade das ações climáticas. A elaboração da NDC de 2024 e do Plano Nacional sobre Mudança do Clima (Plano Clima) representou avanços na tentativa de alinhar metas de mitigação e adaptação com objetivos de desenvolvimento socioeconômico e redução de desigualdades, além de incorporar princípios de transição ecológica (Instituto Talanoa, 2024; Observatório do Clima, 2024) (Quadro 2.3). Entretanto, persistem desafios estruturais — como fragilidade na coordenação interministerial e ausência de mecanismos sólidos de participação pública — que ainda limitam a transformação efetiva dos compromissos climáticos em ações sustentáveis (Climate Action Tracker, 2022; Fattorelli et al., 2015).

Um dos principais desafios diz respeito à superação da fragmentação institucional e de políticas setoriais contraditórias, ainda presente em diversas áreas da administração pública. Isso se reflete na dificuldade de articulação entre planos setoriais e planos temáticos de mitigação e adaptação, bem como na ausência de metas setoriais obrigatórias e em mecanismos robustos de monitoramento, relato e verificação (Keohane & Victor, 2010). Para garantir coerência nas políticas climáticas, é essencial que os objetivos ambientais sejam incorporados a instrumentos de planejamento e orçamento, como o Plano Plurianual (PPA), a Lei de Diretrizes Orçamentárias (LDO) e planos setoriais de longo prazo — o que exige novas capacidades institucionais e maior integração entre níveis de governo e setores (Cairney & Heikkila, 2019).

A legitimidade e a eficácia da governança climática também dependem da ampliação da transparência ativa e da participação social qualificada. Embora o governo tenha lançado a plataforma Brasil Participativo, utilizada para consultas sobre o Plano Clima, a NDC de 2024 não passou por um processo específico e estruturado de escuta da sociedade civil sobre seu conteúdo. A transparência ambiental permanece limitada por lacunas na disponibilização de dados, retrocessos em mecanismos participativos e dificuldade de monitoramento cidadão da implementação das metas. Para alcançar legitimidade pública e engajamento social, é urgente estabelecer canais permanentes e vinculantes de participação da sociedade civil organizada, incluindo representantes de Povos Indígenas, comunidades tradicionais, mulheres, juventudes, setor privado e academia, na formulação, implementação e avaliação das políticas climáticas (Imaflora, 2024).

A governança climática transformadora no Brasil requer a promoção da integração entre mitigação e adaptação, reconhecendo a interdependência entre setores e a natureza multidimensional dos riscos climáticos (IPCC, 2022). Para isso, é essencial superar silos institucionais, adotando análises combinadas de custo-benefício e custo de oportunidade que avaliem estratégias conjuntas de mitigação e adaptação, maximizando cobenefícios socioeconômicos e ambientais (Climate Policy Initiative & PUC-Rio, 2024). O fortalecimento de capacidades técnicas e institucionais, especialmente em níveis subnacionais, é condição para que os entes federativos planejem e executem ações climáticas baseadas em evidências e justiça territorial (Instituto Talanoa, 2024). Consolidar essa governança representa uma oportunidade estratégica para o Brasil trilhar um modelo de desenvolvimento mais justo, resiliente e sustentável (IPCC, 2022; WRI Brasil, 2023).

Quadro 2.3 - Sociobioeconomia de Saudáveis Florestas em Pé e Rios Fluindo: Um Exemplo de Governança Climática Transformadora.

A sociobioeconomia de saudáveis florestas em pé e rios fluindo é um conceito emergente nos países Amazônicos que prioriza o bem-estar das populações e a conservação ambiental, apoiando os direitos e saberes de Povos Indígenas, comunidades locais e demais habitantes. Inspirada por práticas dos Povos Indígenas — como o “Buen Vivir”, que valoriza a relação equilibrada entre natureza e comunidade — essa abordagem combina ciência, tecnologia, inovação e saberes tradicionais para atender às necessidades reais das populações (Garrett, Ferreira, et al. 2023), e convida os formuladores de políticas a considerarem as oportunidades negligenciadas de desenvolvimento inclusivo por não investirem em sociobioeconomias.

No contexto do enfrentamento da crise climática, a sociobioeconomia representa um conceito que pressupõe eliminar o desmatamento e todas as formas de degradação ambiental em ecossistemas terrestres e aquáticos, restaurar a vegetação nativa em áreas desmatadas e degradadas, e promover o uso sustentável, econômico e inovador da biodiversidade. Assim, esta sociobioeconomia pode contribuir para manter e restaurar o carbono estocado na vegetação natural e no solo, ao mesmo tempo em que promove justiça climática, engajando pessoas e organizações no uso inovador do potencial da biodiversidade brasileira (Brandão, Arieira, Nobre, 2024).

Há pelo menos quatro linhas de desenvolvimento da sociobioeconomia que podem contribuir com a mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Neste contexto, destacam-se processos e produtos relacionados com matérias-primas, biotecnologia, gastronomia e biomimética (Nobre e Brandão, 2025). Porém, somente com investimentos volumosos em novos centros de ciência, tecnologia e inovação será possível realizar todo o potencial da sociobioeconomia, que poderá impulsionar o Produto Interno Bruto do Brasil em 1,12% e com estimativas apontando que as sociobioeconomias da Amazônia brasileira poderão atingir USD 7 bilhões até 2050 quase o triplo do valor registrado em 2020 (Nobre et al. 2023, Adeney, Barata, et al., 2024).

Bons exemplos de geração de valor a partir da biodiversidade são empreendimentos como a Cooperativa Agrícola Mista de Tomé-Açu (CAMTA), no Pará, e o Projeto RECA, em Rondônia. Eles demonstram que é possível produzir polpas de frutas, óleos vegetais, palmito, chocolates e muitos outros produtos a partir de matérias-primas regionais, promovendo restauração florestal e o uso sustentável da biodiversidade. Novos produtos com mais valor agregado, como um suplemento concentrado de proteína a base de castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa* Bonpl.), para atender dietas veganas, restritivas e esportivas, podem ser criados com investimento em centros especializados de pesquisa e inovação.

A biotecnologia representa uma fronteira de enorme potencial em todos os biomas brasileiros. Por exemplo, a biodiversidade microbiana presente nos solos florestais da Amazônia, da Mata Atlântica, do Cerrado e da Caatinga pode ser a base para o desenvolvimento de bioinsumos, biofertilizantes e bioestimulantes. Esses produtos podem ser reproduzidos em centros de pesquisa e inovação para contribuir para a melhoria da qualidade dos solos em sistemas agrícolas e florestais, inclusive destinados para projetos de recuperação da vegetação nativa.

A gastronomia baseada na sociobiodiversidade brasileira tem raízes profundas nos conhecimentos de Povos Indígenas e comunidades locais, que domesticaram e utilizam centenas de espécies nativas. Entre elas, destacam-se o açaí e o guaraná na Amazônia, o caju na Caatinga, a araucária, jabuticaba e a erva-mate na Mata Atlântica, o pequi no Cerrado e o mamoncillo no Pantanal. Essas espécies, fundamentais na alimentação de muitas comunidades, hoje ganham espaço em mercados nacionais e internacionais. O potencial gastronômico do conhecimento tradicional da biodiversidade brasileira pode ser fortalecido por meio de cursos de ensino superior voltados ao desenvolvimento agroalimentar das espécies da sociobiodiversidade. Ao mesmo tempo, mecanismos de repartição justa e equitativa de benefícios devem ser aplicados para reconhecer e recompensar os conhecimentos tradicionais desses povos e comunidades.

Quadro 2.3 - Sociobioeconomia de Saudáveis Florestas em Pé e Rios Fluindo: Um Exemplo de Governança Climática Transformadora.

Por fim, a biomimética inspirada na biodiversidade brasileira desponta como uma fonte promissora de inovações sustentáveis para a indústria de alimentos, químicos e máquinas.

A partir da observação dos processos biológicos, físicos e químicos de milhares de espécies nativas, é possível desenvolver soluções tecnológicas como fermentações naturais, espessantes, conservantes, embalagens inspiradas em sementes e frutos, novos solventes, peças aerodinâmicas para drones, entre outros. Investir em centros de pesquisa voltados à biomimética, capacitar especialistas locais e transformar esse conhecimento em produtos e processos, pode posicionar o Brasil como referência global em inovação baseada na natureza.

Assim, a restauração ecológica associada à sociobioeconomia deixa de ser apenas uma resposta ambiental e se consolida como base material, econômica e cultural de um novo paradigma de desenvolvimento justo, regenerativo e enraizado nos territórios. Isso exige políticas públicas e governança multiescalar que reconheçam a diversidade de saberes, territórios e produtos, viabilizando cadeias de valor justas e inovadoras para conservar e usar a biodiversidade de forma sustentável, como previsto no Marco Legal da Biodiversidade (Lei 13.123/2015) (Ribeiro et al., 2020).

Referências

- Abreu, R. C., Tett, S. F. B., Schurer, A. & Rocha, H. R. Attribution of Detected Temperature Trends in Southeast Brazil. **Geophysical Research Letters** 46, 8407–8414 (2019).
- Adeney, J. M., Barata, L. E. S., de Assis Costa, F., Baptiste, B., Oliveira Brandão, D., Juárez Vélez, B., Koch-Weser, M., Oliveira, G., Rogez, H., Fartes Dos Santos E Silva, D., Varese, M., & Arieira, J. (2024). A network of science, technology, and innovation hubs to catalyze regenerative socio-bioeconomies for the Amazon region. **Sustainable Development Solutions Network (SDSN)**. [https://eng-briefs.sp-amazon.org/241018%20Innovation%20Hubs%20PB_Digital%20\(English\).pdf](https://eng-briefs.sp-amazon.org/241018%20Innovation%20Hubs%20PB_Digital%20(English).pdf)
- Albert, J. S., Carnaval, A. C., Flantua, S. G. A., Lohmann, L. G., Ribas, C. C., Riff, D., Carrillo, J. D., Fan, Y., Figueiredo, J. J. P., Guayasamin, J. M., Hoorn, C., Melo, G. H. de, Nascimento, N., Quesada, C. A., Ulloa, C. U., Val, P., Arieira, J., Encalada, A. C., & Nobre, C. A. (2023). Human impacts outpace natural processes in the Amazon. **Science**, 379(6630). <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABO5003>
- Allen, T. et al. Global hotspots and correlates of emerging zoonotic diseases. *Nature Communications* 8, 1–10 (2017).
- Almeida, D. de M. et al. Climate change is expected to reduce the potential distribution of *Ceiba glaziovii* in Caatinga, the largest area of dry tropical forest in South America. **Bioscience Journal** 40, (2024).
- ANA - Agência Nacional De Águas. (2025). **As enchentes no Rio Grande do Sul: lições, desafios e caminhos para um futuro resiliente**. ANA. <http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/25529>
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. (2025, October 19). **SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. <https://www.gov.br/aneel/>.
- Antongiovanni, M., Venticinque, E. M., Tambosi, L. R., Matsumoto, M., Metzger, J. P., & Fonseca, C. R. (2022). Restoration priorities for Caatinga dry forests: Landscape resilience, connectivity and biodiversity value. **Journal of Applied Ecology**, 59, 2287–2298. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14131>
- Archer, D. et al. Atmospheric lifetime of fossil fuel carbon dioxide. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences** 37, 117–134 (2009).
- Arraut, J. M., Nobre, C., Barbosa, H. M. J., Obregon, G. & Marengo, J. Aerial Rivers and Lakes: Looking at Large-Scale Moisture Transport and Its Relation to Amazonia and to Subtropical Rainfall in South America. **Journal of Climate** 25, 543–556 (2012).
- Assad, E. D., & Assad, M. L. R. C. L. (2024). Mudanças do clima e agropecuária: impactos, mitigação e adaptação. Desafios e oportunidades. **Estudos Avancados**, 38(112), 271–292. <https://doi.org/10.1590/S0103-4014.202438112.015>
- Assad, E., Arieira, J., Brandão, D. O., & Nobre, C. A. (2023). **Toward an Amazon Green Deal: the urgent need for an innovative sociobioeconomy and regenerative livestock farming to prevent the Amazon tipping point**.
- Avila-Diaz, A., Benezoli, V., Justino, F., Torres, R., & Wilson, A. (2020). Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. **Climate Dynamics**, 55(5–6), 1403–1426. <https://doi.org/10.1007/S00382-020-05333-Z/METRICS>
- Barkhordarian, A., Saatchi, S. S., Behrangi, A., Loikith, P. C., & Mechoso, C. R. (2019). A Recent Systematic Increase in Vapor Pressure Deficit over Tropical South America. **Scientific Reports**, 9(1), 15331. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51857-8>
- Benzeev, R., Wilson, B., Butler, M., Massoca, P., Paudel, K., Redmore, L., & Zarbá, L. (2022). What's governance got to do with it? Examining the relationship between governance and deforestation in the Brazilian Amazon. **PLOS ONE**, 17(6), e0269729. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0269729>
- Bergier, I., Assine, M. L., McGlue, M. M., Alho, C. J. R., Silva, A., Guerreiro, R. L., & Carvalho, J. C. (2018). Amazon rainforest modulation of water security in the Pantanal wetland. **Science of the Total Environment**, 619–620, 1116–1125. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.163>
- Bevacqua, E., Schleussner, C. F., & Zscheischler, J. (2025). A year above 1.5 °C signals that Earth is most probably within the 20-year period that will reach the Paris Agreement limit. **Nature Climate Change**, 15(3), 262–265. <https://doi.org/10.1038/S41558-025-02246-9>

Borges, B. (2024, March 15). **Estiagem de 2012-21, produtividade agropecuária e transbordamentos na economia | Blog do IBRE**. FGV-IBRE. <https://blogdoibre.fgv.br/posts/estiagem-de-2012-21-productividade-agropecuaria-e-transbordamentos-na-economia>

Borma, L. S., Costa, M. H., da Rocha, H. R., Arieira, J., Nascimento, N. C. C., Jaramillo-Giraldo, C., Ambrosio, G., Carneiro, R. G., Venzon, M., Neto, A. F., van der Hoff, R., Oliveira, B. F. A., Rajão, R., & Nobre, C. A. (2022). Beyond Carbon: The Contributions of South American Tropical Humid and Subhumid Forests to Ecosystem Services. **Reviews of Geophysics**, 60(4), e2021RG000766. <https://doi.org/10.1029/2021RG000766>

Brancalion, P. H. S., de Siqueira, L. P., Amazonas, N. T., Rizek, M. B., Mendes, A. F., Santiami, E. L., Rodrigues, R. R., Calmon, M., Benini, R., Tymus, J. R. C., Holl, K. D., & Chaves, R. B. (2022). Ecosystem restoration job creation potential in Brazil. **People and Nature**, 4(6), 1426–1434. <https://doi.org/10.1002/pan3.10370>

Brandão, D. O., Arieira, J., & Nobre, C. A. (2024). Impactos das mudanças climáticas na sociobioeconomia da Amazônia. **Estudos Avançados**, 38(112), 249–270. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438112.014>
Brasil. (2016). **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA): Volume I – Estratégia Geral**. Ministério do Meio Ambiente.

Brasil. (2016). **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA): Volume I – Estratégia Geral**. Ministério do Meio Ambiente.

Brasil. (2024a). **Nationally determined contribution: Brazil's second nationally determined contribution to the Paris Agreement**. UNFCCC. <https://unfccc.int/documents/643337>

Brasil. (2024b). **First biennial transparency report (BTR1) of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. UNFCCC. <https://unfccc.int/documents/644852>

Brasil. (2024c). **Plano nacional sobre mudança do clima – Plano Clima 2024–2035 (versão para consulta pública)**. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. <https://brasilparticipativo.presidencia.gov.br/processes/planoclima/>

Brasil. (2024d). **Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg 2025–2028)**. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/sbio/dflo/plano-nacional-de-recuperacao-da-vegetacao-nativa-planaveg/planaveg_2025-2028_2dez2024.pdf

Brasil. (2024e). **Estratégia Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: Versão para Consulta Pública**. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. <https://brasilparticipativo.presidencia.gov.br/processes/planoclima/f/87/posts/480>

Brasil. (2024f). Plano Setorial de Adaptação à Mudança do Clima para a Agricultura Familiar (versão preliminar para consulta pública). **Anexo à Estratégia Nacional de Adaptação à Mudança do Clima**. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. <https://brasilparticipativo.presidencia.gov.br/processes/planoclima/f/87/posts/480>

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. (2017). **Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa – Planaveg**. Brasília: MMA. Disponível em <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/sbio/dflo/plano-nacional-de-recuperacao-da-vegetacao-nativa-planaveg> (Acesso em 22 jul. 2025).

BRICS. (2025). **BRICS leaders' framework declaration on climate finance**. https://brics.br/en/documents/presidency-documents/2507_brics_leaders-framework_declaration-on-climate-finance.pdf

Brienen, R. J. W., Phillips, O. L., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., Lopez-Gonzalez, G., Monteagudo-Mendoza, A., Malhi, Y., Lewis, S. L., Vásquez Martinez, R., Alexiades, M., Álvarez Dávila, E., Alvarez-Loayza, P., Andrade, A., Aragaõ, L. E. O. C., Araujo-Murakami, A., Arets, E. J. M. M., Arroyo, L., Zagt, R. J. (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. **Nature**, 519(7543), 344–348. <https://doi.org/10.1038/nature14283> Brito, D., et al. (2018)

Brousseau, J. J., Stern, M. J., Pownall, M., & Hansen, L. J. (2024). Understanding how justice is considered in climate adaptation approaches: A qualitative review of climate adaptation plans. **Local Environment**, 29(12), 1644–1663. <https://doi.org/10.1080/13549839.2024.2386964>

Bulle, R. J. (2018). The climate lobby: a sectoral analysis of lobbying spending on climate change in the USA, 2000 to 2016. **Climatic Change**, 149(3–4), 289–303. <https://doi.org/10.1007/S10584-018-2241-Z>/METRICS

Bulhões, E., & Zaniboni, B. B. (2025). Ensaio Sobre Índices De Extremos Climáticos No Litoral Brasileiro. **Brazilian Geographical Journal**, 16(1), 4–28. <https://doi.org/10.14393/BGJ-V16N1-A2025-69972>

- Bustamante, M. M. C., Nardoto, G. B., Pinto, A. S., Resende, J. C. F., Takahashi, F. S. C., & Vieira, L. C. G. (2012). Potential impacts of climate change on biogeochemical functioning of Cerrado ecosystems. **Brazilian Journal of Biology**, 72(3 SUPPL.), 655–671. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400005>
- Caballero, C. B., Biggs, T. W., Vergopolan, N., Camelo, L. G. G., de Andrade, B. C., Laipelt, L., & L. Ruhoff, A. (2025). Decadal hydroclimatic changes in the Pantanal, the world's largest tropical wetland. **Scientific Reports**, 15(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01980-6>
- Cairney, P., Heikkila, T., & Wood, M. (2019). **Policy capacity and climate governance integration in complex multi-level systems**. Em *Making policy in a complex world*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108679053>
- Calim Costa, M., Marengo, J. A., Alves, L. M., & Cunha, A. P. (2024). Multiscale analysis of drought, heatwaves, and compound events in the Brazilian Pantanal in 2019–2021. **Theoretical and Applied Climatology**, 155(1), 661–677. <https://doi.org/10.1007/S00704-023-04655-2>
- Camilo, J. A., de Lelis Teixeira de Andrade, C., Amaral, T. A., Tigges, C. H. P., de Melo, M. L. A., Chan, C. S., & Garcia y Garcia, A. (2018). Impact of climate change on maize grown in the Brazilian cerrado. **ASABE 2018 Annual International Meeting**. <https://doi.org/10.13031/AIM.201800967>
- Campos, J. de O., & Chaves, H. M. L. (2020). Tendências e Variabilidades nas Séries Históricas de Precipitação Mensal e Anual no Bioma Cerrado no Período 1977-2010. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 35(1), 157–169. <https://doi.org/10.1590/0102-7786351019>
- Candido, S. E. A., Moura, L. H. L. de, Duarte, R. M., & Prieto, J. D. (2023). A construção e desconstrução de capacidades estatais de controle do desmatamento da Amazônia: Do PPCDAm a Bolsonaro. **Estudos de Sociologia**, e023014–e023014. <https://doi.org/10.52780/RES.V28IESP.2.18869>
- Carvalho, R. L., Anjos, D., Harmange, C., Pinter, A., Faust, C., Streicker, D., Lorenz, C., Prist, P. R., & Metzger, J. P. (2025). Unpacking the risks of zoonotic and vector-borne pathogen transmission to humans in the context of environmental change. **One Earth**, 8(8), 101348. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2025.101348>
- Castelo, R. A., Santos De Almeida, D., Luiz Bezerra Da Silveira, A., Da, J., Santos, S., & Olivares, E. L. (2025). Mortalidade na região sudeste do Brasil e acidentes cardiovasculares: ondas de calor como fator agravante e silencioso. **Revista de Medicina**, 104(3.esp.). <https://doi.org/10.11606/ISSN.1679-9836.V104I3.ESP.E-236373>
- Castro, J. W. A., Gouveia Junior, W. C., Fernandes, D., Cabral, C. L., Smith da Costa, G. T., de Miranda, F. M. P. S., Serrano, J. S., Carvalho, K. M., & Lima Junior, S. B. (2025). Impacts of climate change on coastal erosion and marine flooding in Rio de Janeiro city, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 165, 105680. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2025.105680>
- Cattelan, L. G., Mattos, C. R. C., Pamplona, M. B., & Hirota, M. (2024). Mapping Climatic Regions of the Cerrado: General Patterns and Future Change. **International Journal of Climatology**, 44(16), 5857–5872. <https://doi.org/10.1002/JOC.8670>
- CEMADEN. (2024c). Cemaden registra recorde de alertas e mais de 1,6 mil ocorrências de desastre no Brasil em 2024. <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/noticias/cemaden-registra-recorde-de-alertas-e-mais-de-1-6-mil-ocorrencias-de-desastre-no-brasil-em-2024> Acesso em: 20 de junho de 2025.
- Cerri, C. E. P., Cherubin, M. R., Damian, J. M., Mello, F. F. C., & Lal, R. (2021). **Soil carbon sequestration through adopting sustainable management practices: potential and opportunity for the American countries**.
- Brasil. (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidência da República. Recuperado de https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.html
- Clarke, B., Barnes, C., Rodrigues, R., Zachariah, M., Stewart, S., Raju, E., Baumgart, N., Heinrich, D., Libonati, R., Santos, D., Albuquerque, R., Alves, L., Pinto, I., Otto, F., Kimutai, J., Philip, S., Kew, S., Bazo, J., & Wynter, A. (2024). Climate change, not El Niño, main driver of extreme drought in highly vulnerable Amazon River Basin. **Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)**. <https://doi.org/10.25561/108761>
- Climate Action Tracker. (2022). **Climate governance in Brazil: Context and challenges for boards of directors**. Climate Governance Series. ClimateWorks Foundation, NewClimate Institute & Climate Analytics. Retrieved from https://climateactiontracker.org/documents/1015/2022_02_CAT_Governance_Report_Brazil.pdf

- CPI - Climate Policy Initiative. (2024). **Panorama de financiamento climático para uso da terra no Brasil: 2021–2023**. Retrieved from <https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2025/01/Panorama-de-Financiamento-Climatico-para-Uso-da-Terra-no-Brasil-2021-2023.pdf>
- CNM - Confederação Nacional de Municípios. (2025). **Estudo Panorama dos desastres no Brasil - 2013 a 2024**.
- Copernicus Atmosphere Monitoring Service. (2024, September 23). **Pantanal and Amazon wildfires saw their worst wildfires in almost two decades**. <https://atmosphere.copernicus.eu/copernicus-pantanal-and-amazon-wildfires-saw-their-worst-wildfires-almost-two-decades>
- Correa, S. B., de Oliveira, P. C., Nunes da Cunha, C., Penha, J., & Anderson, J. T. (2018). Water and fish select for fleshy fruits in tropical wetland forests. *Biotropica*, 50(2), 312–318. <https://doi.org/10.1111/BTP.12524>
- Costa, F. de A., Larrea, C., Araújo, R., Benatti, J. H., Giraldo, V., Hecht, S., Murmis, M. R., Peters, S., Schmink, M., Terán, E., & Treccani, J. (2023). Land market and illegalities: the deep roots of deforestation in the Amazon. <https://doi.org/10.55161/SLBQ1069>
- Costa, F. R. C., Marengo, J. A., Albernaz, A. L. M., Cunha, A. P., Cuvi, N., Espinoza, J.-C., Ferreira, J., Jimenez-Muñoz, J. C., Páez, M. B., Carramaschi de Algão Querido, L., & Schöngart, J. (2024). **Policy Brief: Droughts in the Amazon**. <https://doi.org/10.55161/LVYB6857>
- Costa, F., & Marengo, J. (2023). **Statement on the 2023 Amazon Drought**. Science Panel for the Amazon. https://www.theamazonwewant.org/spa_publication/statement-on-the-2023-amazon-drought/
- Costa, M. H., Borma, L., Brando, P. M., Marengo, J. A., Saleska, S. R., & Gatti, L. v. (2021). Biogeophysical cycles: Water recycling, climate regulation. In C. et al. Nobre (Ed.), *Amazon Assessment Report 2021*. United Nations Sustainable Development Solutions Network.
- Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf, E., Becker, W. E., Monforti-Ferrario, F., Quadrelli, R., Riquez, M. A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Rossi, S., Melo, J., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., & Vignati, E. (2023). GHG emissions of all world countries. **Publications Office of the European Union**, 134. <https://doi.org/10.2760/953322>
- Cruz, R. C., Poletto, I., Carlos, A., Copetti, C., & Stoll Moraes, B. (2023). **Estratégias para a Mitigação das Mudanças Climáticas no bioma Pampa**. <https://www.researchgate.net/publication/391867071>
- Cunha, A. P. M. A., Buermann, W., & Marengo, J. A. (2024). Changes in compound drought-heat events over Brazil's Pantanal wetland: an assessment using remote sensing data and multiple drought indicators. *Climate Dynamics*, 62(1), 739–757. <https://doi.org/10.1007/S00382-023-06937-X>
- da Rocha, N. S., Veettil, B. K., de Carvalho, C. M., Käfer, P. S., Diaz, L. R., Rolim, S. B. A., & Cruz, R. C. (2021). Potential impacts of air temperature rise in the hydric balance of Brazilian Pampa biome. *Acta Geophysica*, 69(4), 1427–1445. <https://doi.org/10.1007/S11600-021-00589-3/METRICS>
- da Silva, J. O., Galvão, F., da Silva, A. C., & Higuchi, P. (2022). Tree species of Atlantic forest and Pampa alluvial forests in the context of climate change. *Revista Árvore*, 46, e4613. <https://doi.org/10.1590/1806-90882022000013>
- da Silva, S. R. S., Hejazi, M. I., Iyer, G., Wild, T. B., Binsted, M., Miralles-Wilhelm, F., Patel, P., Snyder, A. C., & Vernon, C. R. (2021). Power sector investment implications of climate impacts on renewable resources in Latin America and the Caribbean. *Nature Communications*, 12(1), 1276. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21502-y>
- David Tsai, Renata Potenza, Gabriel Quintana, Anderson Matheus Cardoso, Priscila Alves, Felipe Barcellos e Silva, Ingrid Graces, Helen Sousa, Iris Coluna, Joice Oliveira, Bárbara Zimbres, Julia Shimbo, Camila Silva, Celso Silva-Junior, Wallace Silva, Ane Alencar, & Claudio Angelo. (2024). **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2023**.
- de Castro, D., de Lima, D. A. C., & Romano, C. (2022). The Telecoupling Approach to the Global Food System and Climate Change Regime: The Pivotal Role of Brazil and China. In **Environment and Climate-smart Food Production** (pp. 73–107). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71571-7_3
- de Oliveira, M. L., dos Santos, C. A. C., de Oliveira, G., Perez-Marin, A. M., & Santos, C. A. G. (2021). Effects of human-induced land degradation on water and carbon fluxes in two different Brazilian dryland soil covers. *Science of The Total Environment*, 792, 148458. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.148458>

- Delazeri, L. M. M., Cunha, D. A. da, & Couto-Santos, F. R. (2018). Climate change and urbanization: evidence from the semi-arid region of Brazil. *Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos*, 12(2), 129–154. <https://www.revistaaber.org.br/rberu/article/view/260>
- Delgrossi, M. E., Vieira, L. C. G., Avila, M. L., Valencia Perafán, M. E., & Miranda Filho, R. J. (2024). **The impact of technical assistance and rural extension for poor family farmers: the case of the Dom Hélder Câmara II Program**. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 62(2), e271282. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2022.271282en>
- Dutra, D. J., Silveira, M. V. F., Mataveli, G., Ferro, P. D., Magalhães, D. da S., de Medeiros, T. P., Anderson, L. O., & Aragão, L. E. O. e. C. de. (2024). Challenges for reducing carbon emissions from Land-Use and Land Cover Change in Brazil. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 22(3), 213–218. <https://doi.org/10.1016/J.PECON.2024.04.004>
- Dutra, H. P., Metzger, J. P., & Brancalion, P. H. S. (2024). Restoration as a climate mitigation and adaptation strategy in the Atlantic Forest: Implementation gaps and policy opportunities. *Environmental Science & Policy*, 150, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.01.012.4>
- Espinoza, J. C., Marengo, J. A., Schongart, J., & Jimenez, J. C. (2022). The new historical flood of 2021 in the Amazon River compared to major floods of the 21st century: Atmospheric features in the context of the intensification of floods. *Weather and Climate Extremes*, 35, 100406. <https://doi.org/10.1016/J.WACE.2021.100406>
- Esquivel-Muelbert, A., Baker, T. R., Dexter, K. G., Lewis, S. L., Brienen, R. J. W., Feldpausch, T. R., Lloyd, J., Monteagudo-Mendoza, A., Arroyo, L., Álvarez-Dávila, E., Higuchi, N., Marimon, B. S., Marimon-Junior, B. H., Silveira, M., Vilanova, E., Gloor, E., Malhi, Y., Chave, J., Barlow, J., ... Phillips, O. L. (2019). Compositional response of Amazon forests to climate change. *Global Change Biology*, 25(1), 39–56. <https://doi.org/10.1111/GCB.14413>
- Estevam, C. G., Pavão, E. M., & Assad, E. D. (2023). **Quantificação das emissões de GEE no setor agropecuário: Fatores de emissão, métricas e metodologias** (Relatório técnico). Observatório de Conhecimento e Inovação em Bioeconomia, Fundação Getulio Vargas - FGV, São Paulo, SP, Brasil.
- Estevam, C. G., Pavão, E. M., & Assad, E. D. (2023). **Quantificação das emissões de GEE no setor agropecuário: Fatores de emissão, métricas e metodologias** (Relatório técnico). Observatório de Conhecimento e Inovação em Bioeconomia, Fundação Getulio Vargas - FGV, São Paulo, SP, Brasil.
- FAO - Food and Agriculture Organization. (2016). **State of Food and Agriculture: Climate Change, agriculture, and food security**. Food & Agriculture Organization.
- FAO. (2023). *Agroecology for climate resilience and sustainable food systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/family-farming/themes/agroecology/en/>
- Fatorelli, L., Gebara, M. F., May, P., Zhang, S., & Di Gregorio, M. (2015). The REDD+ governance landscape and the challenge of coordination in Brazil. *CIFOR Infobrief*, 115. Centre for International Forestry Research (CIFOR). <https://www.cifor-icraf.org/knowledge/publication/5508/>
- Feron, S., Cordero, R. R., Damiani, A., Llanillo, P. J., Jorquera, J., Sepulveda, E., Asencio, V., Laroze, D., Labbe, F., Carrasco, J., & Torres, G. (2019). Observations and Projections of Heat Waves in South America. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/S41598-019-44614-4;SUBJMETA>
- Ferreira, M. A. M., Leite, Y. L. R., Junior, C. C., & Vicente, C. R. (2023). Impact of climate change on public health in Brazil. *Public Health Challenges*, 2(1), e62. <https://doi.org/10.1002/PUH2.62>
- Fleischmann, A. S., Laipelt, L., Papa, F., Paiva, R. C. D. de, de Andrade, B. C., Collischonn, W., Biudes, M. S., Kayser, R., Prigent, C., Cosio, E., Machado, N. G., & Ruhoff, A. (2023). Patterns and drivers of evapotranspiration in South American wetlands. *Nature Communications*, 14(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/S41467-023-42467-0;TECHMETA>
- Fletcher, C., Ripple, W. J., Newsome, T., Barnard, P., Beamer, K., Behl, A., Bowen, J., Cooney, M., Crist, E., Field, C., Hiser, K., Karl, D. M., King, D. A., Mann, M. E., McGregor, D. P., Mora, C., Oreskes, N., & Wilson, M. (2024). Earth at risk: An urgent call to end the age of destruction and forge a just and sustainable future. *PNAS Nexus*, 3(4). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgae106>
- Flores, B. M., Montoya, E., Sakschewski, B., Nascimento, N., Staal, A., Betts, R. A., Levis, C., Lapola, D. M., Esquivel-Muelbert, A., Jakovac, C., Nobre, C. A., Oliveira, R. S., Borma, L. S., Nian, D., Boers, N., Hecht, S. B., ter Steege, H., Arieira, J., Lucas, I. L., ... Hirota, M. (2024). Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature* 2024 626:7999, 626(7999), 555–564. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0>

- Fonseca, F. N. de A., & Bustamante, M. M. da C. (2025). The importance of indigenous territories for the provision of ecosystem services: A case study in the Brazilian Cerrado-Amazon Transition. **Ecosystem Services**, 72. <https://doi.org/10.1016/J.ECOSER.2025.101706>
- Franco, M. A., Rizzo, L. v., Teixeira, M. J., Artaxo, P., Azevedo, T., Lelieveld, J., Nobre, C. A., Pöhlker, C., Pöschl, U., Shimbo, J., Xu, X., & Machado, L. A. T. (2025). How climate change and deforestation interact in the transformation of the Amazon rainforest. **Nature Communications**, 16(1), 7944. <https://doi.org/10.1038/S41467-025-63156-0>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Landschützer, P., le Quéré, C., Li, H., Luijckx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., ... Zeng, J. (2025). Global Carbon Budget 2024. **Earth System Science Data**, 17(3), 965–1039. <https://doi.org/10.5194/ESSD-17-965-2025>
- Garrett, R., Ferreira, J., Abramovay, R., Brandão, J., Brondizio, E., Euler, A., Pinedo, D., Porro, R., Rocha, E. C., Sampaio, O., Schmink, M., Torres, B., & Varese, M. (2023). **Supporting Sociobioeconomies of healthy standing forests and flowing rivers in the amazon.**
- Gash, J. H. C., & Nobre, C. A. (1997). Climatic Effects of Amazonian Deforestation: Some Results from ABRACOS. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 78(5), 823–830. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0823:CEOADS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0823:CEOADS>2.0.CO;2)
- Gatti, L. v., Basso, L. S., Miller, J. B., Gloor, M., Gatti Domingues, L., Cassol, H. L. G., Tejada, G., Aragão, L. E. O. C., Nobre, C., Peters, W., Marani, L., Arai, E., Sanches, A. H., Corrêa, S. M., Anderson, L., von Randow, C., Correia, C. S. C., Crispim, S. P., & Neves, R. A. L. (2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, 595(7867), 388–393. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>
- Gatti, L. v., Costa, P. M., Arieira, J., Blackham, G., Alencar, A., Macedo, M., Brown, F., Garavito, S., Suruí, G., Silva, S., Beto Verissimo, Susanna Hecht, & Scott Saleska. (2023). **PB Human Impacts On Carbon Emissions, Losses In Ecosystems Services And Financial Solutions In The Amazon.**
- Getirana, A. (2016). Extreme Water Deficit in Brazil Detected from Space. **Journal of Hydrometeorology**, 17(2), 591–599. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0096.1>
- Girard, P., de Oliveira Roque, F., Cabral de Sousa, W., & Hamilton, S. K. (2025). Expansion of fluvial transport of commodities through the Pantanal floodplains of Brazil: Potential impacts and interference by climate change. **Conservation Science and Practice**, 7(7), e13126. <https://doi.org/10.1111/CSP2.13126>
- Global Forest Coalition. (2025, abril). **Tropical Forest Forever Facility (TFFF): Concept Note 2.0.** Retrieved from <https://globalforestcoalition.org/wp-content/uploads/2025/04/2025-02-24-TFFF-Full-Concept-Note-2.0-Final.pdf>
- Global Foundation. (2024). **Tropical Forests Forever Fund: Proposal for a Global Solution.** Global Foundation.
- Gomes, L. E. de O., Sanders, C. J., Nobrega, G. N., Vescovi, L. C., Queiroz, H. M., Kauffman, J. B., Ferreira, T. O., & Bernardino, A. F. (2021). Ecosystem carbon losses following a climate-induced mangrove mortality in Brazil. **Journal of Environmental Management**, 297, 113381. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.113381>
- Gomes, L., Schüler, J., Silva, C., Alencar, A., Zimbres, B., Arruda, V., Silva, W. V. da, Souza, E., Shimbo, J., Marimon, B. S., Lenza, E., Fagg, C. W., Miranda, S., Morandi, P. S., Marimon-Junior, B. H., & Bustamante, M. (2024). Impacts of Fire Frequency on Net CO₂ Emissions in the Cerrado Savanna Vegetation. **Fire**, 7(8), 280. <https://doi.org/10.3390/FIRE7080280/S1>
- Gomes, V. H. F., Vieira, I. C. G., Salomão, R. P., & ter Steege, H. (2019). Amazonian tree species threatened by deforestation and climate change. **Nature Climate Change** 2019 9:7, 9(7), 547–553. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0500-2>
- Gulizia, C. N., Raggio, G. A., Camilloni, I. A., & Saurral, R. I. (2022). Changes in mean and extreme climate in southern South America under global warming of 1.5 °C, 2 °C, and 3 °C. **Theoretical and Applied Climatology**, 150(1–2), 787–803. <https://doi.org/10.1007/S00704-022-04199-X/METRICS>
- Hacon, S. S., Oliveira, B. F. A., & Silveira, I. (2019). A Review of the Health Sector Impacts of 4 °C or more Temperature Rise. In **Climate Change Risks in Brazil** (pp. 67–129). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92881-4>

- Hecht, S., Schmink, M., Abers, A., Assad, E., Bebbington, D. H., Brondizio, E., Costa, F., Durán Calisto, A. N., Fearnside, P., R., G., Heilpern, S., McGrath, D., Oliveira, G., Pereira, H., & Pinedo-Vazquez, M. (2021). Amazon in Motion: Changing politics, development strategies, peoples, landscapes, and livelihoods. In C. et al. Nobre (Ed.), **Amazon Assessment Report 2021**. United Nations Sustainable Development Solutions Network.
- Hirata, R., & Conicelli, B. P. (2012). Groundwater resources in Brazil: a review of possible impacts caused by climate change. **Anais Da Academia Brasileira de Ciências**, *84*(2), 297–312. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652012005000037>
- Hirota, M., Flores, B. M., Betts, R., Borma, L. S., Esquivel-Muelbert, A., Jakovac, C., Lapola, D. M., Montoya, E., Oliveira, R. S., & Sakschewski, B. (2021). Chapter 24: Resilience of the Amazon forest to global changes: Assessing the risk of tipping points. In **Amazon Assessment Report 2021**. UN Sustainable Development Solutions Network (SDSN). <https://doi.org/10.55161/QPYS9758>
- Hoffmann, R. (2014). A agricultura familiar produz 70% dos alimentos consumidos no Brasil? **Segurança Alimentar e Nutricional**, *21*(1), 417–421. <https://doi.org/10.20396/SAN.V21I1.1386>
- Hofmann, G. S., Cardoso, M. F., Alves, R. J. V., Weber, E. J., Barbosa, A. A., de Toledo, P. M., Pontual, F. B., Salles, L. de O., Hasenack, H., Cordeiro, J. L. P., Aquino, F. E., & de Oliveira, L. F. B. (2021). The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. **Global Change Biology**, *27*(17), 4060–4073. <https://doi.org/10.1111/GCB.15712>
- Hofmann, G. S., Silva, R. C., Weber, E. J., Barbosa, A. A., Oliveira, L. F. B., Alves, R. J. V., Hasenack, H., Schossler, V., Aquino, F. E., & Cardoso, M. F. (2023). Changes in atmospheric circulation and evapotranspiration are reducing rainfall in the Brazilian Cerrado. **Scientific Reports**, *13*(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38174-x>
- Hofmann, G. S., Weber, E. J., Bastazini, V. A. G., Rossatto, D. R., Franco, A. C., Granada, C. E., Kaminski, L. A., Ubaid, F. K., Leandro-Silva, V., Borges-Martins, M., Silva, R. C., Cardoso, M. F., Oliveira, L. F. B., Aquino, F. E., & Pereira, M. J. R. (2025). Climate Change in the Brazilian Cerrado: A Looming Threat to Terrestrial Biodiversity. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, *16*(5), e70022. <https://doi.org/10.1002/WCC.70022>
- Imaflora. (2024). **Mapeamento dos retrocessos de transparência e participação social na política ambiental**.
- INPEa. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2025). **Monitoramento do Uso e Cobertura da Terra nas Áreas Desflorestadas da Amazônia Legal—TerraClass Amazônia**. <http://Terrabrasilis.Dpi.Inpe.Br/Downloads/>
<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/downloads/>
- INPEb - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2025). COORDENAÇÃO-GERAL DE CIÊNCIAS DA TERRA. PROGRAMA DE MONITORAMENTO DOS BIOMAS BRASILEIROS. Deter – **Monitoramento Diário da Supressão e Degradação da Vegetação Nativa – Alertas – Amazônia/Cerrado/Pantanal** – Disponível em: <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/downloads/>.
- INPEb - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2025). Coordenação-Geral de Ciências da Terra. Prodes – Programa de Monitoramento dos Biomas Brasileiros. **Monitoramento Anual da Supressão da Vegetação Nativa – Amazônia/Cerrado/Pantanal/Caatinga/Mata Atlântica/Pampa** – Disponível em: <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/downloads/>. Acesso em: 15 julho. 2025.
- INPEc (2025). **Banco de Dados de queimadas**. Disponível em: <http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas>. Acesso em: 22 de set. 2025
- Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. (2024). **Normais Climatológicas do Brasil**. <https://portal.inmet.gov.br/normais>.
- Instituto Talanoa. (2024). **Financiamento climático por inteiro: O ecossistema do financiamento climático no Brasil**. https://institutotalanoa.org/wp-content/uploads/2024/09/00_NOAukpact-Desktop-v20240912.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability – Summary for Policymakers** (Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- IPAM - Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia. (2025). **Sistema de Alerta de Desmatamento do Cerrado (SAD Cerrado)**. <https://Sadcerrado.Ipam.Org.Br/>
- Amorim, L., Ferreira, R., Dias, M., Souza Jr., C., & Veríssimo, A. Sistema de Alerta de Desmatamento (SAD) – Julho de 2025. **Belém: Imazon**, 2025.

- IPCC. (2014). **Climate Change 2014: Synthesis Report**. [Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- IPCC. (2021). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V. , Masson-Delmotte, 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, & B. Zhou, Eds.). Cambridge University Press.
- IPCC. (2023). Sections. In H. Lee & J. Romero (Eds.), **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 (pp. 35–115). Geneva, Switzerland: IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Joly, C. A., Scarano, F. R., Bustamante, M., Gadda, T. M. C., Metzger, J. P. W., Seixas, C. S., Ometto, J. P. H. B., Pires, A. P. F., Boesing, A. L., Sousa, F. D. R., Quintão, J. M. B., Gonçalves, L. R., Padgurschi, M. de C. G., de Aquino, M. F. D. S., de Castro, P. F. D., & dos Santos, I. L. (2019). Brazilian assessment on biodiversity and ecosystem services: Summary for policy makers. **Biota Neotropica**, 19(4), 20190865. <https://doi.org/10.1590/1676-0611-bn-2019-0865>
- Junk, W. J., Piedade, M. T. F., Schoengart, J., Wittmann, F., & da Cunha, C. N. (2016). Brazilian Wetlands: Classification. In **The Wetland Book** (pp. 1–7). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6172-8_333-1
- Keohane, R. O., & Victor, D. G. (2010). The regime complex for climate change. **Perspectives on Politics**, 9(1), 7–23. <https://doi.org/10.1017/S1537592710004068>
- Koilakou, E., Hatzigeorgiou, E., & Bithas, K. (2024). Social and economic driving forces of recent CO2 emissions in three major BRICS economies. **Scientific Reports**, 14(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58827-9>
- Kolling Neto, A., & Souza, S. A. (2024). Assessment of the effects of land use and cover changes and climatic variability on streamflow in a Brazilian savannah basin. **Theoretical and Applied Climatology**, 155(9), 8755–8770. <https://doi.org/10.1007/S00704-024-05151-X>
- Lapola, D. M., Pinho, P., Barlow, J., Aragão, L. E. O. C., Berenguer, E., Carmenta, R., Liddy, H. M., Seixas, H., Silva, C. V. J., Silva-Junior, C. H. L., Alencar, A. A. C., Anderson, L. O., Armenteras, D., Brovkin, V., Calders, K., Chambers, J., Chini, L., Costa, M. H., Faria, B. L., Walker, W. S. (2023). The drivers and impacts of Amazon forest degradation. **Science**, 379(6630). <https://doi.org/10.1126/science.abp862>
- Lawrence, D., Coe, M., Walker, W., Verchot, L., & Vandecar, K. (2022). The Unseen Effects of Deforestation: Biophysical Effects on Climate. **Frontiers in Forests and Global Change**, 5, 756115. <https://doi.org/10.3389/FFGC.2022.756115/BIBTEX>
- Lázaro, W. L., Oliveira-Júnior, E. S., Silva, C. J. da, Castrillon, S. K. I., & Muniz, C. C. (2020). Climate change reflected in one of the largest wetlands in the world: an overview of the Northern Pantanal water regime. **Acta Limnologica Brasiliensia**, 32, e104. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X7619>
- Leite-Filho, A. T., Soares-Filho, B. S., & de Oliveira, U. (2024). Climate risks to soy-maize double-cropping due to Amazon deforestation. **International Journal of Climatology**, 44(4), 1245–1261. <https://doi.org/10.1002/JOC.8381>
- Libonati, R., Geirinhas, J. o. L., Silva, P. S., Russo, A., Rodrigues, J. A., Belém, L. B. C., Nogueira, J., Roque, F. O., Dacamara, C. C., Nunes, A. M. B., Marengo, J. A., & Trigo, R. M. (2022). Assessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the Pantanal. **Environmental Research Letters**, 17(1). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AC462E>
- Lopes, C. L., & Chiavari, J. (2024). *Forest Restoration in Brazil: Essential Factors for Promoting Restoration at Scale*. Lucena, A. F. P., Hejazi, M., Vasquez-Arroyo, E., et al. (2018). Interactions between climate change mitigation and adaptation: The case of hydropower in Brazil. **Energy**, 164, 1161–1177. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.005>
- Lyra, A., Tavares, P., Chou, S. C., Sueiro, G., Dereczynski, C., Sondermann, M., Silva, A., Marengo, J., & Giarolla, A. (2018). Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and Applied Climatology**, 132(1–2), 663–682. <https://doi.org/10.1007/S00704-017-2067-Z/METRICS>

- Mamede, J. E. L., Silva, L. P., Ferreira, M. F. da S., & Sousa, W. F. de. (2025). A seca na Amazônia em 2023: reflexões sobre os impactos na biodiversidade socioeconômica. **Unifunc Científica Multidisciplinar**, 14(16), 1–13. <https://doi.org/10.24980/ucm.v14i16.6329>
- Manes, S., Costello, M. J., Beckett, H., Debnath, A., Devenish-Nelson, E., Grey, K. A., Jenkins, R., Khan, T. M., Kiessling, W., Krause, C., Maharaj, S. S., Midgley, G. F., Price, J., Talukdar, G., & Vale, M. M. (2021). Endemism increases species' climate change risk in areas of global biodiversity importance. **Biological Conservation**, 257, 109070. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCON.2021.109070>
- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2022). **Agropecuária brasileira em números**. CGPLAC/DAEP/SPA/MAPA. <https://www.gov.br/agricultura>
- MapBiomias Brasil (2023) – **Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. Acesso em set 20 através do link: <https://brasil.mapbiomas.org/>
- Mapbiomas. (2023). **RAD2023: Relatório Anual do Desmatamento no Brasil 2023**.
- MapBiomias. (2025a). **RAD2024: Relatório Anual do Desmatamento no Brasil 2024**. Mapbiomas, São Paulo. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5193>
- Mapbiomas. (2025b). **RAF 2024: Relatório Anual do Fogo - Resultados da Coleção 4 (1985 a 2024)**. <https://doi.org/10.58053/MapBiomias/JKWSW7>
- Marengo, J. A., & Camargo, C. C. (2008). Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002. **International Journal of Climatology**, 28(7), 893–904. <https://doi.org/10.1002/JOC.1584>
- Marengo, J. A., Ambrizzi, T., Reboita, M. S., Costa, M. H., Dereczynski, C., Alves, L. M., & Cunha, A. P. (2023). **Climate Variability and Change in Tropical South America**. 15–44. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21329-8_2
- Marengo, J. A., Camarinha, P. I., Alves, L. M., Diniz, F., & Betts, R. A. (2021b). Extreme Rainfall and Hydro-Geo-Meteorological Disaster Risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C Global Warming Scenarios: An Analysis for Brazil. **Frontiers in Climate**, 3, 610433. <https://doi.org/10.3389/FCLIM.2021.610433/BIBTEX>
- Marengo, J. A., Espinoza, J. C., Fu, R., Jimenez Muñoz, J. C., Alves, L. M., da Rocha, H. R., & Schöngart, J. (2024). Long-term variability, extremes and changes in temperature and hydrometeorology in the Amazon region: A review. **Acta Amazonica**, 54(spe1), e54es22098. <https://doi.org/10.1590/1809-4392202200980>
- Marengo, J. A., Espinoza, J.-C., Fu, R., Jimenez Muñoz, J. C., Muniz Alves, L., Ribeiro da Rocha, H., & Schongart, J. (2021a). Chapter 22: Long-term variability, extremes, and changes in temperature and hydro meteorology. In **Amazon Assessment Report 2021**. UN Sustainable Development Solutions Network (SDSN). <https://doi.org/10.55161/ZGJG8060>
- Marengo, J. A., Galdos, M. v., Challinor, A., Cunha, A. P., Marin, F. R., Vianna, M. dos S., Alvala, R. C. S., Alves, L. M., Moraes, O. L., & Bender, F. (2022). Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. **Climate Resilience and Sustainability**, 1(1), e17. <https://doi.org/10.1002/CLI2.17>
- Marengo, J. A., Torres, R. R., & Alves, L. M. (2017). Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, 129(3–4), 1189–1200. <https://doi.org/10.1007/S00704-016-1840-8>
- Mattos, V. Z. A., Barreto, R. C., & Freitas, M. A. V. (2024). **Implantação de tecnologias agrícolas de baixo carbono na Caatinga: Projeto Rural Sustentável Caatinga**. *Nativa*, 12(4), 682–692. <https://doi.org/10.31413/nat.v12i4.18035>
- MCTI - Ministério da Ciência, T. e I. (2021). **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasil. MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. Brasília – DF.
- MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil: 6. ed. Brasília, DF: Brasil. MCTI, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-aneais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-aneais.pdf>. Acesso em: 19 out. 2025.
- MCTI - Ministério da Ciência, T. e I. (2025, September 1). **Sirene: Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene>.

Melo, R. F. de, & Voltolini, T. v. (2019). Agricultura familiar dependente de chuva no Semiárido. In T. V. (Ed.). In: MELO, R. F. de; VOLTOLINI (Ed.), **Agricultura-familiar-dependente-de-chuva-no-semiarido-2019**. Brasília, DF, Embrapa, 2019. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1114220>

MMA -Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. (2025). **Plano de ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas na Mata Atlântica (PPMata Atlântica) (2025 a 2027)**.

Ministério de Minas e Energia – MME. (2025). **BEN: Relatório Síntese 2025**. <https://www.epe.gov.br/>

Moffette, F., & Gibbs, H.K. (2021). Agricultural displacement and deforestation leakage in the Brazilian Legal Amazon. **Land Economics**, 97(1), 155–179. <https://doi.org/10.3368/wple.97.1.040219-0045R>

Montoya, M. A., Allegretti, G., Sleimann Bertussi, L. A., & Talamini, E. (2021). Renewable and Non-renewable in the energy-emissions-climate nexus: Brazilian contributions to climate change via international trade. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127700. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127700>

Nepstad, D., Seroa da Motta, R., Ardila, J. P., De Los Rios, M., Andrade, A. M., Muccillo, L., Avi, L., Frigeri, F. R., & Vieira, T. (2025). **Amazon forest: A global climate solution**. Earth Innovation Institute. <https://earthinnovation.org/uploads/2025/06/EII%20Amazon%20Forest%20Climate%20Solution%20ENG.pdf>

Neto, A. K., & Souza, S. A. (2024). Assessment of the effects of land use and cover changes and climatic variability on streamflow in a Brazilian savannah basin. **Theoretical and Applied Climatology**, 155(9), 8755–8770. <https://doi.org/10.1007/S00704-024-05151-X>

Niemeyer, M., Rodrigues, R. R., et al. (2019). Planning forest restoration within private land holdings with spatially explicit cost-effectiveness metrics: connectivity and carbon stock benefits. *Science of the Total Environment*, 705, 135262. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135262>.

Niemeyer, A., & Vale, R. S. (2022). Adaptação baseada em ecossistemas na Caatinga: desafios institucionais e oportunidades territoriais. **Revista Brasileira de Política e Administração Pública**, 8(2), 123–145.

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. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2022.106385>

Nobre, C. A., Feltran-Barbieri, R., Costa, F. A., & al., et. (2023). Nova Economia da Amazônia. **WRI Brasil**, São Paulo(23), 24–25.

Nobre, C. A., Sampaio, G., Borma, L. S., Castilla-Rubio, J. C., Silva, J. S., & Cardoso, M. (2016). Land-use and climate change risks in the amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 113(39), 10759–10768. https://doi.org/10.1073/PNAS.1605516113/SUPPL_FILE/PNAS.201605516SI.PDF

Nobre, C. A., Sellers, P. J., & Shukla, J. (1991). Amazonian Deforestation and Regional Climate Change. **Journal of Climate**, 4(10), 957–988. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2)

Obermaier, M., & Rosa, L. P. (2013). Mudança climática e adaptação no Brasil: uma análise crítica. **Estudos Avançados**, 27(78), 155–176. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142013000200011>

Observatório do Clima. (2024). **Bases para proposta de 2ª NDC para o Brasil (2030–2035)**. Nota técnica. Retrieved from https://oc.eco.br/wp-content/uploads/2024/08/NDC-do-OC_2024-template.pdf

Octaviano, C. (2010). Muito além da tecnologia: os impactos da Revolução Verde. **ComCiência**, 120, 0–0. http://comciencia.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-76542010000600006&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt

Olhoff, A., Bataille, C., Christensen, J., den Elzen, M., Fransen, T., Grant, N., Blok, K., Kejun, J., Soubeyran, E., Lamb, W., Levin, K., Portugal-Pereira, J., Pathak, M., Kuramochi, T., Strinati, C., Roe, S., & Rogelj, J. (2024). **Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments**. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404>

Oliveira, P. T. S., Wendland, E., Nearing, M. A., Scott, R. L., Rosolem, R., & da Rocha, H. R. (2015). The water balance components of undisturbed tropical woodlands in the Brazilian cerrado. **Hydrology and Earth System Sciences**, 19(6), 2899–2910. <https://doi.org/10.5194/HESS-19-2899-2015>

- Oliveira, P. T. S., Wendland, E., Nearing, M. A., Scott, R. L., Rosolem, R., & da Rocha, H. R. (2014). **The water balance components of undisturbed tropical woodlands in the Brazilian Cerrado**. <https://doi.org/10.5194/HESD-11-12987-2014>
- Paiva, R. da S., Santana Rodrigues, M., Fonteles de Souza, R., & Rodrigues Olinda Engenheiro Agrônomo, D. (2025). Challenges and perspectives related to climate change and food security in Brazil. **Revista Multidisciplinar Do Nordeste Mineiro**, 1(1), 1–13. <https://doi.org/10.61164/RMNM.V1I1.3433>
- Paterson, M. (2019). Climate-as-condition, the origins of climate change and the centrality of the social sciences. **Dialogues in Human Geography**, 9(1), 29–32. <https://doi.org/10.1177/2043820619829932>
- Pereda, P., & Alves, D. (2018). Climate and weather impacts on agriculture: the case of Brazil. **Economia Aplicada**, 22(3), 5–26. <https://doi.org/10.11606/1980-5330/EA119584>
- Pinho, P. F., Anjos, L. J. S., Rodrigues-Filho, S., Santos, D. v., & Toledo, P. M. (2020). Projections of Brazilian biomes resilience and socio-environmental risks to climate change. **Sustentabilidade Em Debate**, 11(3), 225–241. <https://doi.org/10.18472/SUSTDEB.V11N3.2020.33918>
- Pinto, L. F. G., & Voivodic, M. (2021). Reverse the tipping point of the Atlantic Forest for mitigation. **Nature Climate Change**, 11(5), 364–365. <https://doi.org/10.1038/S41558-021-01035-4>
- Pires, M. O. (2020). ‘Cerrado’, old and new agricultural frontiers. **Brazilian Political Science Review**, 14(3), e0004. <https://doi.org/10.1590/1981-3821202000030006>
- Pivello, V. R., Vieira, I., Christianini, A. v., Ribeiro, D. B., da Silva Menezes, L., Berlinck, C. N., Melo, F. P. L., Marengo, J. A., Tornquist, C. G., Tomas, W. M., & Overbeck, G. E. (2021). Understanding Brazil’s catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. **Perspectives in Ecology and Conservation**, 19(3), 233–255. <https://doi.org/10.1016/J.PECON.2021.06.005>
- Ranasinghe, R., Ruane, A. C., Vautard, R., Arnell, N., Coppola, E., Cruz, F. A., Dessai, S., Saiful Islam, A. K. M., Rahimi, M., Carrascal, D. R., Sillmann, J., Sylla, M. B., Tebaldi, C., Wang, W., & Zaaboul, R. (2021). Climate change information for regional impact and for risk assessment. **Climate Change 2021 – The Physical Science Basis**, 1767–1926. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.014>
- Rezende, C. L., Scarano, F. R., Assad, E. D., Joly, C. A., Metzger, J. P., Strassburg, B. B. N., Tabarelli, M., Fonseca, G. A., & Mittermeier, R. A. (2018). From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, 16(4), 208–214. <https://doi.org/10.1016/J.PECON.2018.10.002>
- Ribeiro, D. B., & Pereira, A. M. M. (2023). Solving the problem of wildfires in the Pantanal wetlands. **Perspectives in Ecology and Conservation**, 21, 271–273. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2023.10.004>
- Ribeiro, S. M. C., Jardim, H. L., de Azevedo, Ú. R., Coelho, V., Bachi, L. S., & Soares-Filho, B. (2020). Non-Timber Forest Products (NTFP) in the Brazilian Amazon and Cerrado biomes: multi scale governance for Implementing enhanced socio-biodiversity chains. **Sustainability in Debate**, 11(2), 43–63. <https://doi.org/10.18472/SUSTDEB.V11N2.2020.28393>
- Roberti, D. R., Mergen, A., Gotuzzo, R. A., Veeck, G. P., Bremm, T., Marin, L., de Quadros, F. L. F., & Jacques, R. J. S. (2024). *Sustainability in natural grassland in the Brazilian Pampa biome: Livestock production with CO₂ Absorption*. **Sustainability**, 16(9), 3672. <https://doi.org/10.3390/su16093672>
- Rodrigues, A. A., Macedo, M. N., Silvério, D. v., Maracahipes, L., Coe, M. T., Brando, P. M., Shimbo, J. Z., Rajão, R., Soares-Filho, B., & Bustamante, M. M. C. (2022). Cerrado deforestation threatens regional climate and water availability for agriculture and ecosystems. **Global Change Biology**, 28(22), 6807–6822. <https://doi.org/10.1111/GCB.16386>
- Roesch, L. F. W., Vieira, F. C. B., Pereira, V. A., Schünemann, A. L., Teixeira, I. F., Senna, A. J. T., & Stefenon, V. M. (2009). The Brazilian Pampa: A Fragile Biome. *Diversity 2009, Vol. 1, Pages 182-198*, 1(2), 182–198. <https://doi.org/10.3390/D1020182>
- Rubert, G. C., Roberti, D. R., Pereira, L. S., Quadros, F. L. F., Velho, H. F. de C., & de Moraes, O. L. L. (2018). Evapotranspiration of the Brazilian Pampa Biome: Seasonality and Influential Factors. *Water 2018, Vol. 10, Page 1864*, 10(12), 1864. <https://doi.org/10.3390/W10121864>
- Sachs, J. D., Lafortune, G., Fuller, G., & Iablonski, G. (2025). *Financing Sustainable Development to 2030 and Mid-Century. Sustainable Development Report 2025*. Dublin University Press. <https://doi.org/10.25546/111909>

- Salmona, Y. B., Matricardi, E. A. T., Skole, D. L., Silva, J. F. A., Coelho Filho, O. de A., Pedlowski, M. A., Sampaio, J. M., Castrillón, L. C. R., Brandão, R. A., Silva, A. L. da, & Souza, S. A. de. (2023). A Worrying Future for River Flows in the Brazilian Cerrado Provoked by Land Use and Climate Changes. **Sustainability (Switzerland)**, 15(5). <https://doi.org/10.3390/SU15054251>
- Sampaio, G., Nobre, C., Costa, M. H., Satyamurty, P., Soares-Filho, B. S., & Cardoso, M. (2007). Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Geophysical Research Letters**, 34(17). <https://doi.org/10.1029/2007GL030612>
- Sansigolo, C. A., & Kayano, M. T. (2010). Trends of seasonal maximum and minimum temperatures and precipitation in Southern Brazil for the 1913–2006 period. **Theoretical and Applied Climatology**, 101(1), 209–216. <https://doi.org/10.1007/S00704-010-0270-2>
- Santos de Lima, L., Silva, F. E. O. e., Dorio Anastácio, P. R., Kolanski, M. M. de P., Pires Pereira, A. C., Menezes, M. S. R., Cunha, E. L. T. P., & Macedo, M. N. (2024). Severe droughts reduce river navigability and isolate communities in the Brazilian Amazon. **Communications Earth and Environment**, 5(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/S43247-024-01530-4;SUBJMETA>
- Seddon, A. W. R., Macias-Fauria, M., Long, P. R., Benz, D., & Willis, K. J. (2016). Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. **Nature**, 531(7593), 229–232. <https://doi.org/10.1038/nature16986>
- SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. (2025, September). **Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa**. Seeg.Eco.Br.
- SGB - Serviço Geológico do Brasil. (2024). 42º Boletim de alerta hidrológico da bacia do Amazonas. SGB, MME. <https://www.sgb.gov.br/sace/boletins/Amazonas>
- Shennan-Farpón, Y., Mills, M., & (2024). Using policy scenarios to assess challenges and opportunities for reaching restoration targets in Brazil's Atlantic Forest. **Environmental Research Letters**, 19(8), 084036. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ad5ab2>
- Silva Dias, M. A. F., Dias, J., Carvalho, L. M. v., Freitas, E. D., & Silva Dias, P. L. (2013). Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. **Climatic Change**, 116(3–4), 705–722. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0504-7>
- Silva Dias, M. A. F., Dias, J., Carvalho, L. M. V., Freitas, E. D., & Silva Dias, P. L. (2013). Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. **Climatic Change**, 116(3–4), 705–722. <https://doi.org/10.1007/S10584-012-0504-7/METRICS>
- Silva Junior, C. H. L., Pessôa, A. C. M., Carvalho, N. S., Reis, J. B. C., Anderson, L. O., & Aragão, L. E. O. C. (2020). The Brazilian Amazon deforestation rate in 2020 is the greatest of the decade. **Nature Ecology & Evolution** 2020 5:2, 5(2), 144–145. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-01368-x>
- Silva, L. F. d. S., Pessoa, L. G. M., Silva, E. M. d., Freire, M. B. G. d. S., de Souza, E. S., Oresca, D., Silva, J. O. N. d., Júnior, G. B., Bezerra, A. C., & Santos, E. S. d. (2024). Changes in soil C, N, and P concentrations and stocks after Caatinga natural regeneration of degraded pasture areas in the Brazilian semiarid region. **Sustainability**, 16(20), 8737. <https://doi.org/10.3390/su16208737>
- Soares, M. C. R., de Mendonça, F. M., & Ferreira, D. M. (2025). O efeito do plano de prevenção e controle do desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm) nas causas diretas do desmatamento. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, 21(2), 1001–1021. <https://doi.org/10.54399/RBGDR.V2112.7825>
- Solórzano, A., de Assis Brasil, L. S. C., & de Oliveira, R. R. (2021). The Atlantic Forest ecological history: From pre-colonial times to the anthropocene. **The Atlantic Forest: History, Biodiversity, Threats and Opportunities of the Mega-Diverse Forest**, 25–44. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55322-7_2
- Sone, J. S., de Oliveira, P. T. S., Zamboni, P. A. P., Vieira, N. O. M., Carvalho, G. A., Macedo, M. C. M., de Araujo, A. R., Montagner, D. B., & Sobrinho, T. A. (2019). Effects of Long-Term Crop-Livestock-Forestry Systems on Soil Erosion and Water Infiltration in a Brazilian Cerrado Site. **Sustainability** 2019, Vol. 11, Page 5339, 11(19), 5339. <https://doi.org/10.3390/SU11195339>
- Soriano, É., de Resende Londe, L., di Gregorio, L. T., Coutinho, M. P., & Santos, L. B. L. (2016). Crise hídrica em São Paulo sob o ponto de vista dos desastres. **Ambiente & Sociedade**, 19(1), 21–42. <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC150120R1V1912016>

- Soterroni, A. C., Ramos, F. M., Mosnier, A., Fargione, J., Andrade, P. R., Baumgarten, L., Pirker, J., Obersteiner, M., Kraxner, F., Câmara, G., Carvalho, A. X. Y., & Polasky, S. (2019). Expanding the soy moratorium to Brazil's Cerrado. *Science Advances*, 5(7), 7336–7353. https://doi.org/10.1126/SCIADV.AAV7336/SUPPL_FILE/AAV7336_SM.PDF
- Sotto, D., & Philippi, A. (2024). Food security and sustainable urban planning for resilient and healthy cities: a multiple case study. *Ambiente & Sociedade*, 27, e00125. <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC0125R1VU27L2OA>
- Strassburg, B. B. N., Brooks, T., Feltran-Barbieri, R., Iribarrem, A., Crouzeilles, R., Loyola, R., Latawiec, A. E., Oliveira Filho, F. J. B., de Scaramuzza, C. A. M., Scarano, F. R., Soares-Filho, B., & Balmford, A. (2017). Moment of truth for the Cerrado hotspot. *Nature Ecology and Evolution*, 1(4), 1–3. <https://doi.org/10.1038/S41559-017-0099;SUBJMETA>
- Strassburg, B. B. N., Brooks, T., Feltran-Barbieri, R., Iribarrem, A., Crouzeilles, R., Loyola, R., Latawiec, A. E., Oliveira Filho, F. J. B., de Mation, L. F., Castro, A., Rangel, M. C., & Balmford, A. (2017). Moment of truth for the Cerrado hotspot. *Nature Ecology & Evolution*, 1(4), 1–3. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0099>
- Strassburg, B.B.N., Beyer, H.L., Crouzeilles, R. et al. Strategic approaches to restoring ecosystems can triple conservation gains and halve costs. *Nat Ecol Evol* 3, 62–70 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0743-8>
- Stríkis, N. M., Buarque, P. F. S. M., Cruz, F. W., Bernal, J. P., Vuille, M., Tejedor, E., Santos, M. S., Shimizu, M. H., Ampuero, A., Du, W., Sampaio, G., Sales, H. dos R., Campos, J. L., Kayano, M. T., Apaestegui, J., Fu, R. R., Cheng, H., Edwards, R. L., Mayta, V. C., ... Novello, V. F. (2024). Modern anthropogenic drought in Central Brazil unprecedented during last 700 years. *Nature Communications*, 15(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/S41467-024-45469-8;TECHMETA>
- Tanure, T. M. do P., Miyajima, D. N., Magalhães, A. S., Domingues, E. P., & Carvalho, T. S. (2020). The Impacts of Climate Change on Agricultural Production, Land Use and Economy of the Legal Amazon Region Between 2030 and 2049. *Economia*, 21(1), 73–90. <https://doi.org/10.1016/J.ECON.2020.04.001>
- Terra, M. C. N. S., Nunes, M. H., Souza, C. R., Ferreira, G. W. D., Prado-Junior, J. A. do, Rezende, V. L., Maciel, R., Mantovani, V., Rodrigues, A., Morais, V. A., Scolforo, J. R. S., & Mello, J. M. de. (2023). The inverted forest: Aboveground and notably large belowground carbon stocks and their drivers in Brazilian savannas. *Science of The Total Environment*, 867, 161320. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.161320>
- Thielen, D., Ramoni-Perazzi, P., Puche, M. L., Márquez, M., Quintero, J. I., Rojas, W., Soto-Werschitz, A., Thielen, K., Nunes, A., & Libonati, R. (2021). The Pantanal under Siege—On the Origin, Dynamics and Forecast of the Megadrought Severely Affecting the Largest Wetland in the World. *Water* 2021, Vol. 13, Page 3034, 13(21), 3034. <https://doi.org/10.3390/W13213034>
- Tomas, W. M., Berlinck, C. N., Chiaravalloti, R. M., Faggioni, G. P., Strüssmann, C., Libonati, R., Abrahão, C. R., do Valle Alvarenga, G., de Faria Bacellar, A. E., de Queiroz Batista, F. R., Bornato, T. S., Camilo, A. R., Castedo, J., Fernando, A. M. E., de Freitas, G. O., Garcia, C. M., Gonçalves, H. S., de Freitas Guilherme, M. B., Layme, V. M. G., ... Morato, R. (2021). Distance sampling surveys reveal 17 million vertebrates directly killed by the 2020's wildfires in the Pantanal, Brazil. *Scientific Reports*, 11(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/S41598-021-02844-5;SUBJMETA=158,2465,4016,631,670;KWRD=BIODIVERSITY,FIRE+ECOLOGY,WETLANDS+ECOLOGY>
- Tomasella, J., Cunha, A. P. de A., & Marengo, J. A. (2023). **Elaboração dos mapas de índice de aridez e precipitação total acumulada para o Brasil**. Nota Técnica: CEMADEN, INPE
- Tomasella, J., do Amaral Cunha, A. M., Zeri, M., & Costa, L. C. O. (2025). Changes in the aridity index across Brazilian biomes. *Science of The Total Environment*, 989, 179869. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2025.179869>
- Torres, R. R., Lapola, D. M., & Gamarra, N. L. R. (2017). Future Climate Change in the Caatinga. *Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region in South America*, 383–410. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3_15
- UNDP - United Nations Development Programme (2025). Forest Finance for the Future: Supporting Climate and Nature Goals. Nova York: Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento.
- UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2023, December 7). UNESCO strengthens fire resilience in the Pantanal and Cerrado to support local communities. Retrieved from <https://www.unesco.org/en>
- Vale, M. M., Arias, P. A., Ortega, G., Cardoso, M., Oliveira, B. F. A., Loyola, R., & Scarano, F. R. (2021). Climate Change and Biodiversity in the Atlantic Forest: Best Climatic Models, Predicted Changes and Impacts, and Adaptation Options. *The Atlantic Forest: History, Biodiversity, Threats and Opportunities of the Mega-Diverse Forest*, 253–267. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55322-7_12

- Vilela, A. A., del Claro, V. T. S., Torezan-Silingardi, H. M., & Del-Claro, K. (2017). Climate changes affecting biotic interactions, phenology, and reproductive success in a savanna community over a 10-year period. **Arthropod-Plant Interactions** 12:2, 12(2), 215–227. <https://doi.org/10.1007/S11829-017-9572-Y>
- Walker, W. S., Gorelik, S. R., Baccini, A., Aragon-Osejo, J. L., Josse, C., Meyer, C., Macedo, M. N., Augusto, C., Rios, S., Katan, T., de Souza, A. A., Cuellar, S., Llanos, A., Zager, I., Mirabal, G. D., Solvik, K. K., Farina, M. K., Moutinho, P., & Schwartzman, S. (2020). The role of forest conversion, degradation, and disturbance in the carbon dynamics of Amazon indigenous territories and protected areas. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 117(6), 3015–3025. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1913321117>
- Wang, X. Y., Li, X., Zhu, J., & Tanajura, C. A. S. (2018). The strengthening of Amazonian precipitation during the wet season driven by tropical sea surface temperature forcing. **Environmental Research Letters**, 13(9), 094015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AADBB9>
- Winck, G. R., Raimundo, R. L. G., Fernandes-Ferreira, H., Bueno, M. G., D'Andrea, P. S., Rocha, F. L., Cruz, G. L. T., Vilar, E. M., Brandão, M., Cordeiro, J. L. P., & Andreazzi, C. S. (2022). Socioecological vulnerability and the risk of zoonotic disease emergence in Brazil. **Science Advances**, 8(26). <https://doi.org/10.1126/SCIADV.ABO5774>
- WMO - World Meteorological Organization. (2025). **State of the Global Climate 2024**. <https://library.wmo.int/records/item/69455-state-of-the-global-climate-2024>
- WRI -World Resources Institute. (2023). **Indigenous forests are some of the Amazon's last carbon sinks**. WRI Insights. <https://www.wri.org/insights/amazon-carbon-sink-indigenous-forests>
- WRI - World Resources Institute. (2024). **O Brasil está pronto para a nova era da adaptação climática?** WRI Brasil. <https://www.wribrasil.org.br/noticias/adaptacao-climatica-brasil-esta-pronto>
- WRI - World Resources Institute.. (2025). **10 questões para entender o financiamento para adaptação**. WRI Brasil. <https://www.wribrasil.org.br/noticias/10-questoes-para-entender-o-financiamento-para-adaptacao>
- Xu, R., Zhao, Q., Coelho, M. S. Z. S., Saldiva, P. H. N., Abramson, M. J., Li, S., & Guo, Y. (2020). Socioeconomic level and associations between heat exposure and all-cause and cause-specific hospitalization in 1,814 Brazilian cities: A nationwide case-crossover study. **PLoS Medicine**, 17(10). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PMED.1003369>
- Zapata-Ríos, G., Andreazzi, C., Carnaval, A., Doria, C., Duponchelle, F., Flecker, A., Guayasamín, J., Heilpern, S., Jenkins, C., Maldonado, C., Meneghelli, D., Miranda, G., Moraes R, M., Silman, M., Silveira, M., Tabet, G., Trujillo, F., Ulloa, C. U., & Arieira, J. (2021). Biological diversity and ecological networks in the Amazon. In C. Nobre, A. Encalada, E. Anderson, F. H. R. Alcazar, M. Bustamante, C. Mena, M. Peña-Claros, G. Poveda, J. P. Rodriguez, S. Saleska, S. Trumbore, A. L. Val, L. V. Nova, R. Abramovay, A. Alencar, A. C. R. Alzza, D. Armenteras, P. Artaxo, S. Athayde, ... G. Zapata-Ríos (Eds.), **Amazon Assessment Report 2021**. United Nations Sustainable Development Solutions Network.
- Zemp, D. C., Schleussner, C. F., Barbosa, H. M. J., Hirota, M., Montade, V., Sampaio, G., Staal, A., Wang-Erlandsson, L., & Rammig, A. (2017). Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. **Nature Communications** 2017 8:1, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/ncomms14681>
- Zemp, D. C., Schleussner, C. F., Barbosa, H. M. J., van der Ent, R. J., Donges, J. F., Heinke, J., Sampaio, G., & Rammig, A. (2014). On the importance of cascading moisture recycling in South America. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 14(23), 13337–13359. <https://doi.org/10.5194/acp-14-13337-2014>
- Zilli, M., Scarabello, M., Soterroni, A. C., Valin, H., Mosnier, A., Leclère, D., Havlík, P., Kraxner, F., Lopes, M. A., & Ramos, F. M. (2020). The impact of climate change on Brazil's agriculture. **Science of The Total Environment**, 740, 139384. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139384>

MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Como acelerar o combate às mudanças climáticas no Brasil?



Adriana Ramos¹

¹Instituto Socioambiental (ISA)

O combate às mudanças climáticas exige ações integradas desde a redução das emissões até a adaptação a seus impactos. A Organização das Nações Unidas propôs a construção de sinergias entre as distintas convenções (clima, biodiversidade e desertificação), pois não é possível cumprir o Acordo de Paris sem conservação e recuperação, que todavia não serão efetivas se a emergência climática não for contida.

A sociedade civil brasileira tem destacado a participação social como fundamento para o avanço das políticas, com especial atenção à presença de povos indígenas, afrodescendentes e comunidades tradicionais em espaços de decisão. É na diversidade de visões de mundo e experiências que reside nosso repertório inovador para o enfrentamento à emergência climática. E nas desigualdades históricas e no racismo ambiental residem os maiores desafios para uma transição efetivamente justa e inclusiva.

Segundo o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), em 2023 as mudanças no uso da terra responderam por 46% das emissões brutas do Brasil, seguidas da agropecuária (28%), energia (18%), resíduos e processos industriais (4% cada). Ou seja, o desmatamento segue como o maior responsável pelas emissões brasileiras. A queda de 12% das emissões brutas do Brasil em relação a 2022, a maior redução desde 2009, foi impulsionada pela queda de 24% nas emissões por desmatamento, resultado da retomada de políticas de comando e controle na Amazônia.

Há mais de uma década, o relatório O Futuro Climático da Amazônia (NOBRE, 2014) consolidou o conhecimento científico sobre como a floresta regula o clima sul-americano. A evapotranspiração e os chamados “rios voadores” mantêm a umidade do ar, produzem chuvas e transportam vapor d’água do oceano ao continente. De lá para cá são inúmeras as evidências de que o desmatamento ameaça esse equilíbrio e pode levar ao ponto de não

retorno — quando a floresta perderia a capacidade de se sustentar, alterando o regime de chuvas e comprometendo o clima de todo o país.

Por isso, zerar o desmatamento e a degradação dos biomas é prioridade. É essencial ampliar áreas protegidas, demarcar terras indígenas, titular territórios quilombolas e acelerar a transição para sistemas agrícolas de baixa emissão e maior resiliência climática. Alguns exemplos são baseados nos princípios da Agroecologia, como sistemas agroflorestais, sistemas integrados lavoura-pecuária-floresta (ILPF), pecuária-floresta (PF). práticas como plantio direto, rotação de cultura, diversificação da produção e controles biológicos, devem ser fomentadas, e apoiadas no âmbito do Plano de Agricultura de Baixo Carbono, que deve ser priorizado. Estratégias como o mercado de carbono, a restauração de áreas degradadas, o zoneamento agrícola de risco climático e a gestão integrada de bacias hidrográficas — incorporando cenários climáticos nas decisões — também são instrumentos fundamentais.

A transição energética deve priorizar fontes limpas. Segundo Carlos Nobre, países tropicais como o Brasil têm vantagem nessa transição pela alta incidência de radiação solar. A eletrificação do transporte e a melhoria da mobilidade urbana, com sistemas públicos eficientes e menos carros particulares, também reduzem emissões e aumentam a resiliência das cidades.

O Brasil abriga experiências inovadoras que combinam saber tradicional, criatividade e solidariedade. O Programa de Cisternas no Semiárido é um exemplo de política pública inspirada em soluções comunitárias. Outras práticas como hortas urbanas e quintais produtivos, bancos comunitários de sementes, mutirões de restauração de nascentes e margens de rios, uso de fogões solares e biogás doméstico também podem ganhar escala com a implementação do Plano Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas. Um grande desafio está no financiamento para universalizar as políticas de adaptação e prevenção de desastres.

Em áreas urbanas, planos locais de adaptação e resiliência devem incluir medidas de infraestrutura verde e drenagem sustentável — jardins de chuva, parques lineares e pavimentos permeáveis — para conter alagamentos e reduzir ilhas de calor, e especial atenção à infraestrutura em áreas de risco, de modo a garantir a segurança da população.

Dentre os vários aspectos que permeiam a tomada de decisão em matéria climática, dois devem ser tomados como fundamentos incontornáveis. O primeiro é a valorização da ciência na orientação das políticas públicas. O outro é a inclusão das variáveis de raça e gênero nas políticas de adaptação. Como bem pontua a Rede por Adaptação Antirracista: “ Sua efetivação visa reduzir os impactos desproporcionais da crise climática e dos eventos climáticos extremos, que afetam principalmente as populações negras, indígenas, quilombolas, tradicionais, periféricas e faveladas, no campo, na cidade, na floresta e nas águas.”.

Para que a inclusão seja efetiva, é preciso garantir uma governança consistente, com participação social real. A sociedade organizada já é um ator importante no desenvolvimento das soluções, inclusive em modelos de governança local. Redes de alerta comunitário, brigadas e protocolos de emergência fortalecem a prevenção e a resposta a enchentes e queimadas, por exemplo.

Por fim, o avanço do Brasil no enfrentamento à crise climática depende também da cooperação internacional e do fortalecimento do financiamento climático, fundamentais para ampliar as soluções de mitigação e adaptação em todo o território.

Referências

NOBRE, Antonio Donato. **O futuro climático da Amazônia: relatório de avaliação científica**. São José dos Campos, SP: ARA: CCST-INPE: INPA, 2014. Acesso em 19 out. 2025. Disponível em: <https://www.ccst.inpe.br/o-futuro-climatico-da-amazonia-relatorio-de-avaliacao-cientifica-antonio-donato-nobre/>

NOBRE, Carlos A. Mudanças climáticas devem impactar produção de energia; mais sol pode ajudar transição. **UOL Ecoa**, 12 nov. 2024. Disponível em: <https://www.uol.com.br/ecoa/colunas/carlos-nobre/2024/11/12/transicao-energetica.html>. Acesso em: 20 out. 2025.

REDE POR ADAPTAÇÃO ANTIRRACISTA. Princípios e diretrizes para o enfrentamento do racismo ambiental no Brasil. In BELMONT, Mariana. **Adaptação antirracista é possível para combater o racismo ambiental**. *Jornal de Psicanálise*, São Paulo, v. 57, n. 107, 2024. E-pub 20 Jan. 2025. Disponível em: https://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-58352024000300225. Acesso em: 21 out. 2025.

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas no Brasil: 1970-2023. 2024**. Disponível em: <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>

Marina Grossi¹

¹Presidente do CEBDS (Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável), entidade com 28 anos de atuação e 120 grandes empresas associadas, Enviada Especial da Presidência da COP30 para o Setor Empresarial.

O mundo passa por rápidas transformações. Protecionismo, guerras tarifárias e abandono de compromissos climáticos criam um vácuo de liderança global, ao mesmo tempo em que a humanidade vivencia na pele os impactos das mudanças climáticas, com o aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos. Assim, 2024 se estabeleceu como o primeiro ano em que o mundo registrou uma temperatura média 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, o limite estabelecido como seguro pela comunidade científica para o aumento da temperatura da Terra. Até o final desta década, caminhamos para um aumento projetado de até 1,9°C na temperatura média global, de acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM).

Todos somos afetados por esses cenários, e o setor empresarial não é exceção. Está claro para cada vez mais empresas que a incerteza sobre a ação climática é um risco aos negócios e que o setor é uma mola propulsora essencial para acelerar a ambição e o progresso no combate a essa grave crise. O relatório [Business Breakthrough Barometer 2025](#), baseado na visão de mais de 300 líderes empresariais em 50 países, aponta para um alto nível de compreensão da importância da ação climática nas companhias.

Segundo a publicação, 94% dos líderes empresariais pesquisados afirmam que políticas de apoio à transição são fatores críticos na tomada de decisões de investimento; e 92% acreditam que o custo da inação em relação ao clima superará o custo da transição. As respostas contidas no estudo questionam a percepção de que as empresas estão se afastando das políticas de neutralidade de carbono — mostram que, na verdade, os investimentos são cada vez mais moldados pela confiabilidade das políticas nacionais voltadas à sustentabilidade.

O estudo foi liderado pelo World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), organização global representada no Brasil pelo Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento

Sustentável (CEBDS). Entre as motivações para persistir na agenda climática, as empresas destacam a busca pela competitividade de longo prazo e a antecipação de um cenário em que as emissões de gases de efeito estufa serão precificadas.

Ou seja, o engajamento das lideranças empresariais na pauta climática não é apenas resposta a obrigações regulatórias ou requisitos de mercado. As empresas estão se concentrando em tecnologias e mercados que oferecem sustentabilidade e retorno comercial, e seguem comprometidas — com 91% afirmando que mantiveram ou aumentaram os investimentos na transição para net zero no último ano. O estudo é global, mas corrobora nossa percepção em relação ao cenário brasileiro. O setor privado reconhece seu papel na aceleração da transição para uma nova economia, baseada em baixo carbono, inclusão social e valorização da natureza.

O Acordo de Paris, firmado em 2015, foi um importante desencadeador desse processo. O tratado internacional assinado por quase 200 países redesenhou o papel e a contribuição das empresas no combate à emergência climática e impulsionou os investimentos em energias renováveis e tecnologias ligadas à transição energética. Foi justamente a partir dele que as empresas passaram a assumir metas climáticas voluntárias, assinalando uma mudança de postura por parte dos atores não governamentais — setor privado, investidores, cidades e governos subnacionais.

É neste contexto que se encaixa a nova Contribuição Nacional Determinada (NDC) do Brasil, anunciada na COP29 em Baku, no Azerbaijão, e que traz metas robustas (redução entre 59% e 67% das emissões até 2035, em relação a 2005). O compromisso exigirá que diferentes setores se movam nessa direção, e isso já está acontecendo.

A pedido da Presidência da COP30, a vanguarda do setor empresarial brasileiro está engajada na formação de coalizões voltadas à descarbonização de setores-

chave da economia brasileira: Energia, Pecuária, Agricultura, Floresta, Mineração e Transporte. Os seis eixos foram considerados prioritários pelo governo brasileiro e os caminhos para a descarbonização estão sendo traçados em uma cooperação inédita entre entidades setoriais, empresas e academia. É a resposta do setor produtivo a um chamado, partindo do entendimento de que a transição para uma economia de baixo carbono não é apenas uma responsabilidade, mas também uma grande oportunidade para o desenvolvimento sustentável, geração de valor e competitividade internacional.

Nós temos vantagens comparativas inequívocas associadas à sustentabilidade, como a maior biodiversidade do planeta e uma matriz energética com alto percentual de fontes renováveis. Ao acelerar as estratégias de descarbonização da economia, as empresas brasileiras têm a oportunidade histórica de posicionar o Brasil como liderança inquestionável na transição para um novo modelo de desenvolvimento.

Ana Carolina Crisostomo¹ Jarlene Gomes²

1 Especialista em conservação e políticas públicas na WWF-Brasil

2 Pesquisadora no Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia - IPAM

As metas climáticas do Brasil apresentadas na Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), entregue em 2024 durante a COP 29, sinalizam um avanço importante na ambição do país em reduzir suas emissões, com destaque para a meta de desmatamento zero até 2030. O Brasil, com suas proporções continentais e tendo como principais fontes de emissões o desmatamento e a agropecuária, já demonstrou sua capacidade de resposta: reduziu em 83% o desmatamento na Amazônia entre 2024 e 2012, através de esforços conjunto de políticas públicas de monitoramento, ordenamento territorial e fundiário, controle ambiental e de incentivo a atividades produtivas sustentáveis. Importante destacar a responsabilização do setor privado, empresarial e financeiro, fundamental para a queda do desmatamento observada. Apesar dos retrocessos e desafios políticos, o país possui uma estrutura interfederativa de gestão ambiental, arcabouço legal robusto e a capacidade científica-tecnológica que o colocam em posição de liderança na mitigação das mudanças climáticas. A experiência acumulada e as lições aprendidas mostram que acelerar o combate às mudanças no clima no Brasil depende da ampliação da escala e integração entre políticas.

A agenda climática não pode ser pensada por biomas, de forma isolada. A degradação do Cerrado e da Amazônia estão profundamente conectadas: a perda de vegetação em um bioma acelera a degradação do outro. O Cerrado, 2º maior bioma do país e conhecido como “berço das águas” por abastecer as principais bacias hidrográficas do país, já perdeu mais de 50% de sua vegetação nativa. Estudos indicam que a superfície natural de água no bioma caiu de 62% para 40% entre 1985 e 2024.

Segundo dados do Relatório Anual do Desmatamento (RAD), 2024, a área média desmatada por dia no Brasil foi de 3.403 ha –

ou 141,8 hectares por hora, sendo 1.786 hectares por dia no Cerrado e 1.035 há/dia na Amazônia, o que equivale a cerca de 7 árvores por segundo. A lógica de sacrificar o Cerrado para proteção da Amazônia precisa ser urgentemente revista, e toda essa degradação intensifica a pressão sobre a Amazônia. É necessária uma abordagem de longo prazo que considere impactos sistêmicos e sinérgicos do desmatamento e da conversão do uso da terra em ambos os biomas.

Entre os eixos de políticas para o controle do desmatamento o ordenamento territorial e fundiário precisa avançar. No passado, o país criou diversas Unidades de Conservação, mas pouco caminhou na regularização fundiárias de Terras Indígenas, Territórios Quilombolas e de Povos e Comunidades Tradicionais (PCTs). Estudos demonstram que essas áreas apresentam taxas de desmatamento menores que o seu entorno, justamente porque são manejadas com base em seus modos de vida tradicionais. Não por acaso lideranças locais são pressionadas por empresas em busca de créditos de carbono, muitas vezes assediando lideranças com contratos abusivos e ilegais.

O fortalecimento desses territórios exige titulação, apoio à gestão, garantia de participação plena nos espaços de decisão climática, além de financiamento adequado. Estes são elementos indispensáveis a uma estratégia climática responsável e justa, com garantia de direitos humanos e justiça ambiental.

A decisão histórica, obtida na COP 16 da Biodiversidade em 2024, que reconheceu e incluiu no Quadro Global da Biodiversidade o papel dos afrodescendentes na conservação da biodiversidade reafirma essa importância. A criação do Programa Regional Quilombos das Américas, de iniciativa do Brasil e Colômbia, é um exemplo importante para o aporte de

recursos à agenda. Implementar de forma articulada as Convenções do Clima e da Biodiversidade pode ser a chave para avançar na titulação e proteção desses territórios estratégicos, impulsionando medidas que irão acelerar a mitigação das mudanças climáticas.

Contudo, a realidade no Brasil é alarmante: cálculos estimam que, ao ritmo atual, serão necessários 2.188 anos para titular integralmente os 1.802 processos abertos no Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (Incra). Povos indígenas enfrentam a ameaça do Marco Temporal, tese que afirma que esses grupos só teriam direito à terra se estivessem em sua posse na data da promulgação da Constituição de 1988, ignorando todo o processo histórico violento de expropriação sofrido pelos povos originários. No caso dos outros 28 segmentos de PCTs falta instrumento normativo para a titulação de seus territórios.

O setor do uso da terra apresenta importantes oportunidade de gerar saldo positivo de carbono na agenda nacional. Mas para isso é preciso enfrentar os entraves políticos da regularização fundiária, articular agendas setoriais e integrar políticas públicas. Se conseguir avançar nesses caminhos, o Brasil não apenas cumprirá suas metas de desmatamento zero, mas também avançará na mitigação das mudanças climáticas promovendo justiça climática e reparação histórica aos povos e comunidades tradicionais e indígenas.

Páginas de referência

<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/controle-ao-desmatamento-queimadas-e-ordenamento-ambiental-territorial/controle-do-desmatamento-1/amazonia-ppcdam-1>

<https://brasil.mapbiomas.org/en/2025/03/21/pantanal-e-o-bioma-que-mais-perdeu-superficie-de-agua-em-relacao-a-media-historica-61/>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378025000421>

<https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.0913048107>

<http://repositorio2.unb.br/handle/10482/51872>

<https://www.nature.com/articles/s41598-023-32746-7>

<https://www.nature.com/articles/s41559-024-02458-w>

<https://www.terradedireitos.org.br/noticias/noticias/no-atual-ritmo-brasil-levara-2188-anos-para-titular-todos-os-territorios-quilombolas-com-processos-no-incra/23871>