ISSN 1413-9375

cgee

Parcerias Estratégicas

Edição especial

Volume 30 - Número 55 - Dezembro 2025

COP30 BRASIL AMAZÔNIA

Mutirão científico brasileiro para a COP30

- Mobilização de capital para o clima: o papel das garantias
- Soluções baseadas na Natureza (SbN) nas cidades brasileiras: evidências para o fortalecimento de políticas públicas
- A crítica da inteligência artificial sustentável
- Ciência, tecnologia e inovação (CT&I) para a Amazônia: subsídios para cadeias sustentáveis de pesquisa e produção
- Inovações e planejamento territorial na convivência com a seca e a desertificação: pontos para a reflexão e ação (em 2025, ano da III Conferência ICID/UNCCD e 30ª COP/UNFCCC)
- O papel da inteligência artificial no avanço da previsão de extremos de tempo e clima: Sistema Inteligente de Previsão de Extremos Climáticos
- A construção de um projeto nacional de transição energética frente aos dilemas atuais da cooperação internacional na COP30
- Mudanças do clima: a contribuição do MCTI para as políticas nacionais e para os compromissos internacionais do Brasil
- Beyond planning: making climate technology implementation finally happen



Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Ciência, Tecnologia e Inovação

O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) edita publicações sobre diversas temáticas que impactam a agenda do Sistema Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (SNCTI).

As edições são alinhadas à missão institucional do Centro de subsidiar os processos de tomada de decisão em temas relacionados à ciência, tecnologia e inovação, por meio de estudos em prospecção e avaliação estratégica baseados em ampla articulação com especialistas e instituições do SNCTI.

As publicações trazem resultados de alguns dos principais trabalhos desenvolvidos pelo Centro, dentro de abordagens como produção de alimentos, formação de recursos humanos, sustentabilidade e energia. Todas estão disponíveis gratuitamente para *download*.

A instituição também produz, semestralmente, a revista Parcerias Estratégicas, que apresenta contribuições de atores do SNCTI para o fortalecimento da área no País.

Você está recebendo uma dessas publicações, mas pode ter acesso a todo o acervo do Centro pelo nosso site: *http://www.cgee.org.br.*

Boa leitura!

Parcerias Estratégicas

Edição Especial

v. 30, n. 55, dezembro de 2025, Brasília-DF

ISSN 1413-9375

Parc. Estrat. | Brasília - DF | v. 30 | n. 55 | p. 1-194 | jul-dez 2025

Parcerias Estratégicas – v. 30 – n. 55 – dezembro de 2025 – Edição especial

A revista Parcerias Estratégicas é publicada semestralmente pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) e tem por linha editorial divulgar e debater temas nas áreas de educação, ciência, tecnologia e inovação (CT&I). Distribuição gratuita. Disponível eletronicamente em: <*http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas*>.

Edição
Danúzia Queiroz / Contexto Gráfico

Conselho editorial
Adriano Batista Dias (Fundaj)
Eduardo Baumgratz Viotti (Consultor legislativo do Senado Federal para assuntos de política de CT&I)
Gilda Massari (S&G Gestão Tecnológica e Ambiental/RJ)
Ricardo Bielschowsky (UFRJ)
Ronaldo Mota Sardenberg (Consultor)

Projeto gráfico
Núcleo de Design Gráfico do CGEE

Capa, diagramação e infográficos
Contexto Gráfico

Endereço para correspondência
SCS Q. 9, Lote C, Torre C, salas 401 a 405, Ed. Parque Cidade Corporate, Brasília DF, CEP 70308-200, telefone: (61) 3424-9600, E-mail: editoria@cgee.org.br

Indexada em: Latindex; EBSCO publishing; bibliotecas internacionais das instituições: Michigan University, Maryland University; Université du Quebec; Swinburne University of Technology; Delaware State University; National Defense University; San Jose State University; University of Wisconsin-Whitewater; Qualis/Capes.

Parcerias Estratégicas / Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – Vol. 1, n.1 (maio 1996) • Brasília: CGEE, 2002–

Semestral

De 1996 a 2001 editada pelo Centro de Estudos Estratégicos (CEE/MCT).

ISSN1413-9375

1. Ciência e Tecnologia – Períodicos 2. Inovação tecnológica – Brasil I. CGEE.

CDU 323.6(81)(05)

O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) é uma associação civil sem fins lucrativos e de interesse público, qualificada como organização social pelo executivo brasileiro, sob a supervisão do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), tendo como instituição interveniente o Ministério da Educação (MEC). Constitui-se em instituição de referência para o suporte contínuo aos processos de tomada de decisão sobre políticas e programas de ciência, tecnologia e inovação (CT&I) e educação. A atuação do Centro está concentrada nas áreas de prospecção, avaliação estratégica, informação e difusão do conhecimento.

Diretor-presidente
Fernando Cosme Rizzo Assunção

Diretores
Anderson Stevens Leonidas Gomes
Caetano Christophe Rosado Penna

Diretor administrativo financeiro
Geraldo Nunes Sobrinho

Comunicação Integrada do CGEE

Coordenador
Jean Marcel da Silva Campos

Apoio técnico-administrativo
Luciane Penna Firme Horna

Assessora de Comunicação
Bianca Torreão

Estagiária/Jornalismo
Clara Espinoza

Designers
Eduardo José Lima de Oliveira
Cleyton Santos Ferreira

Estagiária/*Design*
Iasmin Morena

Eventos
Jessica de La Torres
Milena Fernandes

Estagiária/Eventos
Evellyn Rodrigues

Edição
Maisa Cardoso

Esta edição da revista Parcerias Estratégicas é parte integrante das atividades desenvolvidas pelo CGEE no âmbito do 3º Contrato de Gestão firmado com o MCTI.

Parcerias Estratégicas não se responsabiliza por ideias emitidas em artigos assinados. São permitidos a reprodução e o armazenamento dos textos, desde que citada a fonte.

Conselho de Administração CGEE – outubro 2025

Membros natos - Representantes de entidades da sociedade civil

Mario Sérgio Carraro Telles (CNI) – Titular
Fabricio Silveira (CNI) – Suplente
Aldo José Gorgatti Zarbin (SBPC) – Titular
Fernanda Antonia da Fonseca Sobral (SBPC) – Suplente
Roberto Lúcio Rocha Brant (CNA) – Titular
Matheus Ferreira Pinto da Silva (CNA) – Suplente
Álvaro Toubes Prata (ABC) – Titular
Virginia Sampaio Teixeira Ciminelli (ABC) – Suplente

Membros natos representantes do poder público

Raphael Padula (MCTI) – Titular
Daniel Gomes de Almeida Filho (MCTI) – Suplente
Rubens Diniz Tavares (MCTI) – Titular
Maria Luiza Nogueira Rangel (MCTI) – Suplente
Luis Antonio Rodrigues Elias (Finep) – Titular
Janaina Prevot Nascimento (Finep) – Suplente
Ricardo Magnus Osório Galvão (CNPq) – Titular
Olival Freire Junior (CNPq) – Suplente
Denise Pires de Carvalho (MEC) – Titular
Marcus Vinicius David (MEC) – Suplente

Membros eleitos

Odir Antonio Dellagostin (Confap) – Titular | Presidente do Conselho
Vahan Agopyan (Consecti) – Suplente
Lucia Carvalho Pinto de Melo (Representante dos associados) – Titular
Raimar van den Bylaardt (Representante dos associados) – Suplente
Agnaldo de Almeida Dantas (Sebrae) – Titular
Alexandre Sampaio Ferraz (Dieese) – Suplente
Marcela Chami Gentil Flores (Anpei) – Titular
Diego Silva Menezes (Abipti) – Suplente
Silvia Márcia Ferreira Meletti (Foprop) – Titular
Adriana Ferreira de Faria (Anprotec) – Suplente

Um agradecimento especial à equipe que conduz a Agenda Positiva da Mudança do Clima e do Desenvolvimento Sustentável no CGEE:

Marcelo Khaled Poppe

Daniella Fartes dos Santos e Silva

Emilly Caroline Costa Silva

Gabriela Teixeira Britto

... pela fundamental colaboração na organização da pauta e na mobilização dos autores que tornaram possível a elaboração desta edição especial da revista Parcerias Estratégicas

Sumário

07 Aos leitores

09 Prefácio

Seção 1
Mutirão científico brasileiro para a COP30

15 Mobilização de capital para o clima: o papel das garantias
Maria Netto, Emilio Lèbre La Rovere, Lucca Rizzo, Victoria de Castro, Jean-Charles Hourcade

29 Soluções baseadas na Natureza (SbN) nas cidades brasileiras: evidências para o fortalecimento de políticas públicas
Fabiana Wütrich, Raiza Gomes Fraga, Beatriz Vilela, Tatiana Maria Cecy Gadda

49 A crítica da inteligência artificial sustentável
Pedro Ivo Ferraz da Silva

65 Ciência, tecnologia e inovação (CT&I) para a Amazônia: subsídios para cadeias sustentáveis de pesquisa e produção
Maria Carlota de Souza-Paula, Adriana Badaró de Carvalho

85 Inovações e planejamento territorial na convivência com a seca e a desertificação: pontos para a reflexão e ação (em 2025, ano da III Conferência ICID/UNCCD e 30ª COP/UNFCCC)
Antonio Carlos Filgueira Galvão

111 O papel da inteligência artificial no avanço da previsão de extremos de tempo e clima: Sistema Inteligente de Previsão de Extremos Climáticos
Paulo Nobre , Alessandra Cristina Corsi, Marcel Rodrigues de Barros, Francisco José Lopes de Lima, Thalyta Soares dos Santos, Werner Conrado Jacob Denzin, Felipe Pacheco de Almeida Euphrásio, Jorge Luis Gomes, Aline Fernandes Heleno, Wanderley Oliveira Mendes, Thierry Pinheiro Moreira, Fábio José Muneratti Ortega, Diogo Nunes da Silva Ramos, Leonardo B. L. Santos, Allan Rodrigues Silva, Felipe Silva Silles, Denis Bruno Viríssimo, André Brasil Vieira

139 A construção de um projeto nacional de transição energética frente aos dilemas atuais da cooperação internacional na COP30
Thiago Vasconcellos Barral Ferreira, Leandro Albuquerque de Oliveira

153 Mudanças do clima: a contribuição do MCTI para as políticas nacionais e para os compromissos internacionais do Brasil
Osvaldo Luiz Leal de Moraes, Andrea Latge, Ima Celia Guimarães Vieira, Márcio Rojas

169 Beyond planning: making climate technology implementation finally happen
Emilly Caroline Costa Silva, Gabriela Teixeira Britto, Marcelo Khaled Poppe, Caetano Christophe Rosado Penna

Aos leitores

A 30ª Conferência das Partes (COP30) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, realizada em Belém do Pará, marca um momento decisivo para o Brasil e para o mundo, ao impulsionar o avanço de compromissos e a implementação de ações concretas de mitigação e adaptação às mudanças do clima. O País reafirma seu compromisso com a ciência, a inovação e a cooperação internacional como pilares da ação climática e da transição para um modelo de desenvolvimento sustentável.

O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) tem como missão realizar estudos prospectivos e produzir conhecimento estratégico que subsidie políticas públicas de ciência, tecnologia e inovação. Historicamente, o CGEE tem contribuído para as discussões sobre ciência, tecnologia e inovação no contexto das negociações climáticas, participando de edições anteriores da COP com análises e estudos que apoiam a formulação de políticas públicas.

Estar presente na COP30 e lançar este número especial da revista *Parcerias Estratégicas* é, portanto, uma honra e um marco para o CGEE. A 55ª edição deste periódico tem como objetivo promover a reflexão e o debate qualificado sobre ciência, tecnologia e inovação no contexto da agenda climática, abordando temas como cooperação internacional, transferência de tecnologias climáticas, finanças climáticas e transição energética.

A coletânea apresenta uma visão ampla e integrada dos desafios e das oportunidades da agenda climática brasileira e internacional. Os artigos discutem novos instrumentos financeiros para a mobilização de capital e garantias voltadas ao clima; o papel da inteligência artificial na previsão de eventos climáticos extremos e na construção de modelos tecnológicos sustentáveis; além da contribuição da ciência e da diplomacia para o fortalecimento das políticas climáticas nacionais.

Também são abordados temas como: a transição energética justa e inclusiva; o planejamento territorial e a convivência com a seca e a desertificação; as Soluções baseadas na Natureza (SbN) nas cidades brasileiras; e as cadeias sustentáveis de produção e pesquisa na Amazônia. A edição inclui, ainda, uma análise sobre o desenvolvimento e a implementação de tecnologias climáticas, destacando a importância de transformar a ambição climática em ação mensurável e de fortalecer capacidades locais e a cooperação internacional.

Ao reunir pesquisadores, gestores públicos, formuladores de políticas e representantes da academia, esta edição busca estimular o diálogo entre diferentes atores e fomentar parcerias para o desenvolvimento de soluções inovadoras em mitigação e adaptação climática. A publicação reforça o compromisso do CGEE com a ciência como instrumento de transformação e com a cooperação internacional em prol de um futuro sustentável.

O lançamento da revista durante a COP30 reforça a missão do CGEE de produzir e disseminar conhecimento estratégico, em convergência com as três prioridades da Conferência: reforçar o multilateralismo, conectar o regime climático à vida real das pessoas e acelerar a implementação do Acordo de Paris. Ao contribuir para esse esforço coletivo, o CGEE busca subsidiar políticas públicas, apoiar tomadores de decisão e inspirar a cooperação entre as instituições de pesquisa, os organismos internacionais e o setor produtivo, ampliando a integração entre ciência, política e sociedade.

O CGEE reafirma, assim, seu compromisso com o desenvolvimento sustentável, deixando sua contribuição ao desafio global de escalar soluções concretas e transformar sistemas sociais e econômicos, sempre amparado pela ciência, para construir uma trajetória equilibrada, inclusiva e de baixo carbono.

Boa leitura!

Fernando Rizzo
Diretor-presidente
Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)

Prefácio

O ano de 2024 foi o primeiro a registrar que a temperatura média global ultrapassou 1,5º C acima dos níveis pré-industriais. As chuvas torrenciais no Rio Grande do Sul e a seca histórica na Amazônia deixam explícito que a mudança do clima já invade nossas casas, destrói milhares de vidas e representa ameaça sem precedentes à estabilidade financeira global.

Apesar dos alertas, até agora, não fomos capazes de agir com a rapidez necessária para nos afastarmos de um modelo de desenvolvimento ultrapassado, baseado em combustíveis fósseis e na destruição de nossas florestas. Se no passado essa lógica trouxe benefícios socioeconômicos para alguns, hoje todos vivemos a consequência dessas escolhas – o que, há algumas décadas, era um problema futuro antecipou-se às previsões para ser o presente.

Mas a mudança para um novo modelo de desenvolvimento mais sustentável e de baixo carbono já está em curso. A Conferência das Partes (COP30) dará largada a uma nova década de aceleração do combate à crise climática e a um modelo de desenvolvimento que traga prosperidade sem pôr em risco o planeta. Como escreveu o presidente da COP30, embaixador André Corrêa do Lago, em sua primeira carta à comunidade internacional, "a mudança é inevitável – seja por escolha ou catástrofe". Evitar um cataclismo demanda nos organizarmos, de maneira coletiva e individual, para uma transformação civilizacional: a transição da economia linear para a circular; de uma economia dependente de combustíveis fósseis para uma movida por renováveis; de uma agricultura extensiva que derrubava nossas florestas para uma agricultura regenerativa.

Sabemos o que precisamos fazer e temos os instrumentos necessários para fazê-lo. Em 2015, caminhávamos para um aquecimento global superior a 4°C. Se implementarmos todos os compromissos assumidos na primeira década do Acordo de Paris por meio das Contribuições Nacionalmente Determinadas (CND), estaremos na rota para um aumento na faixa de 2,1°C a 2,8°C. Isto é uma demonstração de que o regime climático está funcionando, mas a realidade deixa claro que agora o grande desafio é acelerar a implementação e a transformação econômica – o que impulsionará metas ainda mais ambiciosas. Só assim atingiremos o objetivo estabelecido no Acordo de Paris de não ultrapassar 1,5º C.

A COP30 é guiada por três prioridades: reforçar o multilateralismo, conectar o regime climático à vida real das pessoas e acelerar a implementação do Acordo do Paris. Belém deve romper paradigmas na resposta global à crise climática: escalar soluções concretas, inovar e transformar nossos sistemas sociais e econômicos. Tudo sempre amparado e direcionado pela ciência.

Os cientistas brasileiros estão na vanguarda da compreensão de nossos desafios e de soluções que podem nos ajudar a combater à crise do clima. A ciência brasileira vem indicando impactos, riscos e opções para acelerar a adaptação e a mitigação. Também vem orientando políticas públicas consistentes dos governos federais, estaduais e municipais.

O trabalho de nossas universidades e centros de pesquisa, por exemplo, foi fundamental para políticas públicas, como o Plano Clima, os Planos para Prevenção e Controle do Desmatamento, o Plano de Transformação Ecológica e o Plano de Agricultura de Baixo Carbono – iniciativas que ajudarão o Brasil a cumprir suas metas climáticas e se preparar para a realidade de um planeta mais quente. São pesquisas que inovam, informam, mostram novas possibilidades e servem de munição contra o negacionismo.

Os temas abordados nesta edição da *Revista Parcerias Estratégicas*, publicada pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), são partes-chave desse processo, apresentando visão ampla e integrada dos desafios e das oportunidades da agenda climática contemporânea para o Brasil e o mundo. Os autores reforçam que a resposta à crise climática exige uma abordagem integrada, baseada em ciência, inovação e justiça social.

Os textos abordam ferramentas como modelagem climática, inteligência artificial, financiamento e soluções baseadas na natureza, evidenciando a importância de transformar conhecimento técnico em impacto real. Esse debate é crucial para orientar estratégias globais e locais, reforçando que a rápida e ambiciosa ação só será possível com o alinhamento entre ciência, tecnologia e políticas públicas. É nessa base que construiremos respostas eficazes à emergência climática. O primeiro artigo, de Osvaldo Moraes, Andrea Latge e coautores, apresenta as contribuições do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) para as políticas nacionais e os compromissos internacionais do Brasil no enfrentamento das mudanças climáticas. O texto destaca o papel da ciência como base orientadora para as políticas públicas, articulando conhecimento técnico e ação estratégica em escala nacional e global.

Em seguida, Paulo Nobre e colaboradores exploram o potencial da inteligência artificial no aprimoramento da previsão de eventos extremos de tempo e clima, com foco no projeto do Sistema de Pessoal Civil da Administração Federal/Plano Brasileiro de Inteligência Artificial (Sipec/PBIA). O artigo evidencia o avanço da modelagem climática e das capacidades preditivas do País, demonstrando como a aplicação de tecnologias emergentes pode fortalecer a resiliência climática e reduzir vulnerabilidades socioeconômicas.

O terceiro texto, de Pedro Ivo Ferraz, propõe uma reflexão crítica sobre a inteligência artificial sustentável, analisando os impactos ambientais e sociais dessa tecnologia e questionando sua real contribuição para o desenvolvimento sustentável. Ao mesmo tempo, o autor propõe caminhos para uma abordagem mais ética, frugal e inclusiva, especialmente no contexto do Sul global.

O artigo de Emilly Caroline, Caetano Penna e seus coautores discute o desenvolvimento e a transferência de tecnologias climáticas como elementos centrais para a implementação efetiva do Acordo de Paris. Os autores destacam a importância de fortalecer capacidades locais, ecossistemas de inovação e mecanismos de cooperação que permitam traduzir o conhecimento científico em soluções práticas de mitigação e adaptação climática.

Em seguida, Maria Netto, Emílio La Rovere e seus coautores abordam a mobilização de capital para o clima, destacando o papel das garantias financeiras na redução de riscos e na viabilização de investimentos em projetos climáticos. O texto enfatiza a necessidade de instrumentos financeiros inovadores, especialmente nos países em desenvolvimento, para alavancar o financiamento climático global.

O artigo de Thiago Barral e Leandro de Oliveira examina os desafios da transição energética no Brasil, à luz dos cenários do Plano Nacional de Energia 2055. Os autores ressaltam a importância de construir uma transição justa, inclusiva e sustentável, articulando política energética, inovação tecnológica e justiça climática, em um contexto em que o Brasil tem a oportunidade de liderar o debate global sobre descarbonização.

No texto seguinte, Fabiana Wütrich, Raiza Fraga e coautores apresentam uma análise sobre as Soluções baseadas na Natureza (SbN) em cidades brasileiras, trazendo evidências e estudos de caso que demonstram o potencial dessas estratégias para fortalecer as políticas públicas de resiliência urbana. O artigo reforça a importância de abordagens integradas, colaborativas e fundamentadas em evidências para promover cidades mais sustentáveis e inclusivas.

Antonio Carlos Filgueira Galvão, por sua vez, discute as inovações e o planejamento territorial na convivência com a seca e a desertificação, contextualizando o tema tanto na III Conferência Internacional sobre Terras Secas (Icid) quanto na COP30. O autor propõe reflexões e ações concretas voltadas à adaptação climática e ao uso sustentável dos territórios, articulando saberes tradicionais e inovação científica.

Encerrando esta edição, Maria Carlota de Souza-Paula e Adriana Badaró apresentam uma contribuição sobre ciência, tecnologia e inovação (CT&I) para a Amazônia, destacando subsídios para o fortalecimento de cadeias produtivas sustentáveis na região. O artigo sintetiza resultados do projeto "CT&I para a Amazônia", coordenado pelo CGEE, e propõe diretrizes estratégicas para o desenvolvimento científico e tecnológico da região amazônica, em harmonia com a conservação ambiental e o bem-estar das populações locais.

A crise climática exige uma resposta urgente e unificada, e a COP30 é o momento-chave para consolidar essa mudança. Ampliar a ambição e acelerar a implementação nos permitirá não apenas evitar os piores efeitos do aquecimento global, mas também criar uma trajetória de desenvolvimento mais sustentável, equilibrada e inclusiva.

A COP30 em Belém impulsionará soluções concretas que fortaleçam a ação multilateral e acelerem nossa transformação para uma economia de baixo carbono de forma justa e inclusiva. O esforço precisa ser coletivo, solidário e eficaz: um mutirão global contra a mudança do clima para mudarmos de um modelo de desenvolvimento superado para outro mais sustentável, próspero, resiliente e equitativo. Devemos isso a nós mesmos e a muitas gerações que virão depois.

Ana Toni
CEO da COP30

Seção 1
Mutirão científico brasileiro para a COP30

Mobilização de capital para o clima: o papel das garantias

Soluções baseadas na Natureza (SbN) nas cidades brasileiras: evidências para o fortalecimento de políticas públicas

A crítica da inteligência artificial sustentável

Ciência, tecnologia e inovação (CT&I) para a Amazônia: subsídios para cadeias sustentáveis de pesquisa e produção

Inovações e planejamento territorial na convivência com a seca e a desertificação: pontos para a reflexão e ação (em 2025, ano da III Conferência ICID/UNCCD e 30ª COP/UNFCCC)

O papel da inteligência artificial no avanço da previsão de extremos de tempo e clima: Sistema Inteligente de Previsão de Extremos Climáticos

A construção de um projeto nacional de transição energética frente aos dilemas atuais da cooperação internacional na COP30

Mudanças do clima: a contribuição do MCTI para as políticas nacionais e para os compromissos internacionais do Brasil

Beyond planning: making climate technology implementation finally happen

Mobilização de capital para o clima: o papel das garantias

Maria Netto[1], *Emilio Lèbre La Rovere*[2], *Lucca Rizzo*[3], *Victoria de Castro*[4], *Jean-Charles Hourcade*[5]

Resumo

O artigo descreve as garantias financeiras como instrumento de redistribuição de riscos e viabilização de projetos climáticos – apontando para seu potencial na ampliação do financiamento climático – e o papel que podem vir a ter no cumprimento das metas do Acordo de Paris e da Nova Meta Coletiva Quantificada. Estima-se que os investimentos climáticos globais precisem alcançar US$ 6,5 trilhões por ano

Abstract

The article describes financial guarantees as an instrument for redistributing risks and enabling climate projects, highlighting their potential in expanding climate finance and the role they may play in meeting the goals of the Paris Agreement and the New Quantified Collective Target. It is estimated that global climate investments need to reach US$6.5 trillion per year by 2030, with more than half

1 Diretora executiva do Instituto Clima e Sociedade (iCS). Ela foi especialista principal do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), chefe da divisão de instituições financeiras no *New Development Bank* e atuou por mais de 10 anos na secretaria da Convenção-Quadro sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) [do Inglês, *United Nations Framework Convention on Climate Change*]. Mestra em Economia pelo Instituto de Estudos Internacionais de Genebra.

2 Professor titular do Programa de Planejamento Energético da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Coppe/UFRJ), coordenador do Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente e do Centro Clima. Doutor em Economia na *École des Hautes Études en Sciences Sociales* (EHESS) (Paris, 1980).

3 Especialista sênior em Finanças Climáticas do iCS. Advogado e mestre em Políticas Internacionais pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), com foco em financiamento da bioeconomia amazônica.

4 Especialista em Finanças Climáticas e COP30 do iCS. Mestra em Administração Pública para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) pela Universidade Tsinghua e em Inovação, Desenvolvimento Humano e Sustentabilidade pela Universidade de Genebra. Anteriormente, atuou como secretária do Grupo de Trabalho de Finanças Sustentáveis do G20, cedida do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (Pnud) para o Ministério da Fazenda (MF) do Brasil.

5 Diretor de pesquisas emérito no Centro Nacional de Pesquisa Científica (CNRS) [do Francês, *Centre National de la Recherche Scientifique*] na França, diretor de estudos na EHESS, pesquisador no Centro Internacional de Pesquisa sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (Cired). Doutor de Estado em Economia na Universidade de Vincennes (1984).

até 2030, com mais da metade desse esforço ocorrendo em países em desenvolvimento e economias emergentes. O artigo destaca a importância do uso estratégico de recursos públicos para mobilizar capital privado, corrigir falhas de mercado e reduzir riscos percebidos.

Palavras-chave: Financiamento climático. Investimento climático. Garantias financeiras. Desenvolvimento sustentável. Acordo de Paris. NCQG. Adaptação. Resiliência.

of this effort occurring in developing countries and emerging economies. The article highlights the importance of the strategic use of public resources to mobilize private capital, correct market failures, and reduce perceived risks.

Keywords: *Climate finance. Climate investment. Financial guarantees. Sustainable development. Paris agreement. NCQG. Adaptation. Resilience.*

1. Introdução: o desafio global do financiamento climático

Alcançar as metas do Acordo de Paris, promover o desenvolvimento sustentável e proteger os mais vulneráveis exigem uma transformação massiva nos padrões de investimento global. No terceiro relatório do *Independent High-Level Expert Group on Climate Finance* (IHLEG, 2024), estima-se que os investimentos climáticos globais precisam alcançar US$ 6,5 trilhões por ano até 2030, subindo para US$ 8 trilhões até 2035. Mais da metade desse esforço deve ocorrer em países emergentes e economias em desenvolvimento (EMDE) [do Inglês, *emerging markets and developing economies*], que precisam atrair, doméstica e internacionalmente, ao menos, US$ 2,4 trilhões anuais até 2030 (excluindo a China) (IHLEG, 2024).

Contudo, esses números colossais contrastam com o contexto de restrição fiscal crescente. Mais de 60% dos países de baixa renda enfrentam altos níveis de endividamento, enquanto os fluxos de assistência oficial ao desenvolvimento (ODA) [do Inglês, *official development assistance*] seguem insuficientes – apenas 0,33% da renda nacional bruta dos países doadores em 2022, longe da meta de 0,7%. Simultaneamente, as crises econômicas, a fragmentação geopolítica com anúncios consideráveis de reduções de ODA e o custo dos impactos econômicos da mudança do clima intensificam os desafios para o financiamento público.

Nesse contexto, os recursos públicos devem ser utilizados de maneira estratégica e eficiente como catalisadores da mobilização de recursos privados, da criação de mercados climáticos funcionais e para facilitar acesso e reduzir os custos de investimentos. Isso significa, na prática, priorizar o uso do financiamento público para corrigir falhas de mercado, reduzir riscos percebidos e atrair investidores para setores e contextos nos quais o investimento privado, por si só, não ocorreria.

Em particular, o financiamento público deve ser direcionado prioritariamente para viabilizar investimentos climáticos com forte adicionalidade – ou seja, aqueles que dificilmente ocorreriam sem intervenção pública – e que gerem impacto climático e social relevante. Sua função deve ser multiplicadora e habilitadora, permitindo que cada dólar público mobilize múltiplos dólares privados em condições mais favoráveis.

O presente artigo, portanto, apresentará o papel dos recursos públicos domésticos e internacionais como catalisadores de recursos privados, por meio da prestação de garantias e outras estruturas de mitigação de riscos. Além de trazer uma análise do contexto de financiamento climático global, também mencionará exemplos de mecanismos em diferentes países.

2. Diferentes fontes de financiamento climático

O volume disponível de financiamento público é limitado, mas sua capacidade de transformar o perfil de risco dos investimentos pode ser determinante para destravar o financiamento climático em escala, sobretudo em países com alto risco soberano, baixa profundidade de mercado ou tecnologias, ainda, em fase inicial de adoção.

O financiamento privado constitui um dos pilares centrais da agenda de financiamento climático contemporânea. Ele oferece escala, disciplina comercial e capacidade de inovação que o financiamento público, por si só, não é capaz de prover. Além disso, desempenha papel fundamental na construção de novos mercados e no amadurecimento de mercados existentes, promovendo uma alocação mais eficiente dos recursos e uma gestão mais eficaz dos riscos.

O capital privado também tem o potencial de acelerar a adoção e a difusão de tecnologias climáticas, especialmente nos casos em que essas soluções já atingiram viabilidade técnica, mas enfrentam barreiras comerciais ou institucionais.

O financiamento doméstico – proveniente, em geral, de bancos comerciais locais, investidores institucionais e mercados de capitais nacionais – pode ser especialmente eficaz por estar alinhado às necessidades específicas dos países, oferecendo financiamento em moeda local e contribuindo ao desenvolvimento e à profundidade dos mercados financeiros domésticos.

Já o financiamento privado transfronteiriço é essencial para aportar escala, *expertise* técnica e capacidade de inovação. Ambos os fluxos – doméstico e internacional – desempenham papéis complementares, sendo indispensável uma abordagem coordenada entre os instrumentos e os atores envolvidos para garantir sua eficácia e maximizar seus impactos.

O capital privado pode ser mobilizado em diferentes ritmos e setores relacionados ao clima. Embora grande parte das oportunidades de investimento se concentre na transição energética de baixo carbono – com estimativas em torno de US$ 2 trilhões de um total de US$ 3,2 trilhões em necessidades anuais identificadas –, há também necessidade urgente de ampliar os investimentos em adaptação, resiliência e soluções baseadas na natureza.

Nesse contexto, as instituições financeiras (incluindo bancos e seguradoras) desempenham papel essencial, ao passo que empresas e cadeias produtivas têm responsabilidade direta na adoção de práticas mais sustentáveis e resilientes diante dos impactos climáticos.

O capital privado pode escalar soluções de adaptação e resiliência em setores, como agricultura, recursos hídricos, infraestrutura e saúde, contribuindo para a proteção de ativos físicos, redução da volatilidade econômica e promoção de um crescimento mais sustentável. Além disso, pode estimular o desenvolvimento de novas cadeias de valor de impacto positivo sobre a natureza, envolvendo redes de micro, pequenas e médias empresas (MPME) voltadas à restauração de ecossistemas, ao aumento da biodiversidade e à agricultura regenerativa.

Contudo, a realidade mostra uma lacuna significativa: os fluxos privados transfronteiriços para os EMDE permanecem abaixo de US$ 30 bilhões por ano, quando seriam necessários entre US$ 400 e 500 bilhões anuais até 2030. Atrair financiamento climático privado para esses países exige o uso estratégico de recursos públicos, um ambiente regulatório favorável e sistemas financeiros mais eficientes para atrair investimentos em escala. Isso inclui:

- Mitigação de riscos em fases iniciais do projeto.
- Apoio a etapas de preparação e estruturação de projetos.
- Financiamento de projetos-piloto com impacto demonstrável.
- Desenvolvimento de instrumentos financeiros híbridos (*blended finance*).
- Mecanismos de repartição de risco.
- Apoio técnico e capacitação institucional.

É especialmente importante fomentar instrumentos financeiros inovadores voltados à atração de capital privado para setores historicamente subfinanciados, como adaptação, resiliência, conservação da natureza e biodiversidade. Tais instrumentos são fundamentais não apenas para viabilizar projetos em contextos de alto risco percebido, mas também para desbloquear o potencial transformador de setores essenciais à segurança e à sustentabilidade global.

3. Barreiras estruturais ao financiamento climático nos EMDE

O avanço da agenda climática nos países em desenvolvimento depende da superação de barreiras estruturais ao investimento. Apesar do crescente reconhecimento sobre a necessidade de escalar o financiamento climático, especialmente para adaptação, resiliência e soluções baseadas na natureza, os fluxos de capital continuam desproporcionalmente baixos. O uso estratégico de instrumentos de mitigação de riscos – em especial garantias financeiras – representa uma das ferramentas mais promissoras para enfrentar essas barreiras e catalisar o engajamento do setor privado em escala.

Com relação aos investimentos climáticos, os países emergentes e as economias em desenvolvimento enfrentam uma combinação de barreiras sistêmicas que elevam os custos de financiamento e reduzem a atratividade dos projetos. Entre os principais entraves, destacam-se:

- **Custo elevado de capital:** reflexo de riscos macroeconômicos, como volatilidade inflacionária, fragilidade fiscal, instabilidade cambial e fundamentos de crescimento frágeis. Em muitos EMDE, o custo de capital pode ser de duas a três vezes maior do que em economias avançadas, tornando projetos comercialmente inviáveis, mesmo quando tecnicamente sólidos.
- **Riscos percebidos e reais em tecnologias climáticas**: que incluem incertezas quanto à *performance*, aos custos operacionais, à viabilidade comercial e ao suporte regulatório, especialmente em setores emergentes, como hidrogênio verde ou agricultura regenerativa.
- **Riscos políticos e regulatórios:** as mudanças em subsídios ou tarifas, a insegurança jurídica, o risco de expropriação ou a instabilidade institucional reduzem a previsibilidade de longo prazo, necessária para investimentos de capital intensivo.
- **Risco de contraparte:** particularmente em projetos públicos ou com empresas locais sem histórico robusto de crédito ou governança financeira.
- **Rebaixamento de crédito soberano e avaliações de crédito adversas:** muitas vezes agravados por vulnerabilidades climáticas que não são devidamente compensadas por investimentos em resiliência nos modelos de avaliação de risco, o que aumenta o custo do endividamento.
- **Assimetria de informação:** investidores institucionais – como fundos de pensão, seguradoras e gestoras de ativos – frequentemente não têm presença local, conhecimento das dinâmicas de mercado ou acesso a dados sobre riscos físicos, financeiros e operacionais nos EMDE.
- **Lacunas na preparação de projetos:** especialmente em termos de informações sobre patrocinadores, estruturas financeiras, análises de risco, e viabilidade econômica e ambiental.

Essas barreiras resultam em percepções inflacionadas de risco que, por sua vez, reforçam a escassez de investimento privado, criando ciclos viciosos de subinvestimento, sobretudo em setores com baixa ou incerta geração de receita direta, como adaptação ou conservação de ecossistemas.

4. Garantias: redistribuindo riscos e liberando capital

Para alavancar o financiamento privado em países em desenvolvimento, é essencial reduzir os riscos percebidos pelos investidores. Nesse aspecto, garantias financeiras são instrumentos eficientes para redistribuir riscos, aumentar a previsibilidade e viabilizar projetos que, de outro modo, seriam considerados inviáveis.

Funcionalmente, uma garantia equivale a uma promessa de pagamento por parte de um terceiro confiável – como um banco multilateral, um fundo climático ou uma instituição pública –, em caso de inadimplência ou eventos adversos. Ao transferir parte do risco de crédito, risco político, cambial ou de *performance*, as garantias melhoram o perfil de risco-retorno de projetos climáticos, especialmente em contextos de alta incerteza macroeconômica.

As garantias financeiras podem redistribuir riscos específicos de crédito, cambial, político ou de desempenho para instituições com maior capacidade financeira e credibilidade, melhorando a atratividade dos projetos e reduzindo o custo de capital. Além de viabilizarem investimentos que, de outro modo, não ocorreriam, as garantias permitem alavancar recursos privados em múltiplos do capital público envolvido. Estudos recentes mostram que garantias bem desenhadas podem mobilizar entre 5 vezes e 15 vezes o valor garantido em capital privado, dependendo do risco coberto, da estrutura e do contexto.

Entre os papéis estratégicos que as garantias podem ter para destravar financiamento climático, destacam-se:

- Estender os prazos de empréstimos, fundamentais para projetos de infraestrutura verde.
- Oferecer a proteção contra riscos cambiais, por meio de garantias em moeda local ou plataformas de *hedge*.
- Reduzir os riscos políticos e regulatórios, especialmente em concessões públicas ou mercados regulados.
- Apoiar as carteiras de projetos liderados por MPME, distribuindo riscos em portfólios setoriais.
- Aumentar a previsibilidade e a confiança de investidores institucionais com baixa exposição a mercados emergentes.

- Reduzir exigências prudenciais de capital para instituições financeiras locais, permitindo que ampliem sua capacidade de empréstimo.

Diferentes atores podem ter papel importante na estruturação de garantias, incluindo os bancos públicos de desenvolvimento (PDB) [do Inglês, *public development banks*], os bancos multilaterais de desenvolvimento (MDB) [do Inglês, *multilateral development banks*], as instituições financeiras de desenvolvimento (DFI) [do Inglês, *development financial institutions*] e o setor privado. A filantropia e os investidores de impacto e de capital paciente podem também ter papel-chave na organização de estruturas subordinadas ou de primeiras perdas (*first-loss*), que são essenciais para viabilizar as garantias em setores de risco elevado.

Um exemplo de mecanismo inovador de garantia é o AGRI3, um fundo de financiamento misto, lançado em 2020, com o objetivo de mobilizar até US$ 1 bilhão em capital público e privado para promover a agropecuária sustentável, a conservação florestal e os sistemas alimentares resilientes em economias emergentes.

O fundo começou como uma parceria entre o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma) e o Rabobank, que foi ampliada para incluir o banco holandês de Desenvolvimento Empresarial (FMO) [do Holandês, *Nederlandse Financierings-Maatschappij voor Ontwikkelingslanden*], a iniciativa para o comércio sustentável (IDH) [do Inglês, *sustainable trade initiative*], o ministério das Relações Exteriores da Holanda como doador e o Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF) [do Inglês, *Global Environment Facility*] como investidor. Com cerca de US$ 80 milhões já investidos em garantias e mais de US$ 200 milhões mobilizados em capital privado, o fundo oferece mecanismos de aprimoramento de crédito para intermediários financeiros, permitindo que estes apoiem produtores, processadores, comerciantes, fornecedores de insumos e instituições financeiras locais ao longo da cadeia de valor (CPI, 2024).

Apesar de sua eficácia, as garantias seguem subutilizadas. Entre 2021 e 2023, os fluxos globais de *blended finance* com garantias permaneceram abaixo de US$ 20 bilhões por ano. Diversas barreiras explicam essa inércia:

- **Mandatos restritivos** de bancos multilaterais e agências de desenvolvimento, que priorizam volume de empréstimos em vez de mobilização privada.
- **Regras prudenciais (Basileia III),** que impõem exigências de capital desproporcionais a ativos de risco em países em desenvolvimento.
- **Dificuldade de contabilização, como ODA**, reduzindo incentivos para doadores utilizarem as garantias como instrumentos de cooperação.

- **Falta de padronização e replicabilidade**, com garantias sendo, muitas vezes, desenhadas sob medida e com alto custo de transação.
- **Falta de coordenação entre fundos verticais e bancos multilaterais**, fragmentando a capacidade de escalar soluções.

Para destravar o uso de garantias em escala, é necessário rever mandatos institucionais, fortalecer mecanismos de contabilização de mobilização e aprimorar o ecossistema de dados, métricas e avaliação de impacto – pautas que vêm sendo discutidas com maior frequência no cenário internacional.

5. Momento internacional favorável à expansão das garantias

Apesar de ainda subutilizadas, as garantias vêm ganhando destaque no debate internacional como instrumentos estratégicos para alavancar investimentos privados em projetos de desenvolvimento sustentável e ação climática. Frente à crescente urgência de mobilizar capital em escala para enfrentar os desafios globais, diversos atores multilaterais, fóruns econômicos e coalizões internacionais têm impulsionado iniciativas para expandir o uso das garantias, reformar marcos regulatórios e criar novas plataformas institucionais voltadas à sua implementação.

Desde 2022, o Grupo dos Vinte (G20) tem recomendado reformas nos critérios de adequação de capital (CAF) [do Inglês, *capital adequacy framework*] – para facilitar o uso de garantias por bancos multilaterais de desenvolvimento (BMD). O objetivo é permitir que os BMD possam assumir mais riscos sem comprometer sua classificação de crédito. Essa flexibilização regulatória tem o potencial de expandir significativamente a capacidade de alavancagem das garantias, tornando-as instrumentos mais eficazes na mobilização de recursos privados para o clima.

Durante a Conferência das Partes (COP) 28 [do Inglês, *Conference of the Partie*], realizada em 2023, foi lançado o *Green Guarantee Group* (CPI, 2025), uma coalizão de bancos multilaterais, agências de crédito à exportação e fundos climáticos que visam a coordenar e escalar o uso de garantias verdes. Essa iniciativa marca o reconhecimento formal, em um fórum climático global, da importância das garantias na arquitetura financeira internacional.

Em 2024, o Grupo Banco Mundial anunciou um compromisso ambicioso de triplicar o uso de garantias oferecidas pela Agência Multilateral de Garantia de Investimentos (Miga) [do Inglês, *Nederlandse Financierings-Maatschappij voor Ontwikkelingslanden*], com a meta de atingir US$ 20 bilhões em garantias até 2030. A Miga é uma instituição-chave no ecossistema de garantias, oferecendo cobertura contra riscos políticos e financeiros em países em desenvolvimento.

Esse aumento previsto representa uma mudança de escala significativa, reforçando o papel das garantias como instrumento catalisador de investimentos climáticos.

Em 2025, sob a presidência brasileira dos Brics,[6] para fortalecer o investimento do setor privado e a resiliência financeira, os países do Brics propuseram a incubação de um mecanismo de garantia multilateral do Brics (BMG) [do Inglês, *Brics multilateral guarantees*], dentro do Novo Banco de Desenvolvimento (NDB) (Brics, 2025). Essa abordagem permitirá uma fase de testes estruturada para avaliar a viabilidade da ferramenta, seu modelo operacional e sua sustentabilidade financeira.

Um dos marcos esperados da COP30, que será sediada em Belém/Brasil, em 2025, é a apresentação do chamado *Roteiro Baku-Belém*. A proposta visa a posicionar as garantias como instrumento central para viabilizar US$ 1,3 trilhão em investimentos climáticos até 2035. Trata-se de uma resposta estratégica à crescente demanda por mecanismos financeiros que combinem impacto climático, escalabilidade e mitigação de risco. O roteiro pretende articular bancos multilaterais, investidores institucionais e governos em torno de uma estrutura integrada de garantias climáticas.

Em paralelo, ganha força a ideia de criar um Mecanismo Suprassoberano de Garantias Climáticas (MSGC) – uma coalizão de países e instituições que ofereçam garantias coordenadas, com alta credibilidade e impacto multiplicador, que poderia ter a COP30 como momento de divulgação do desenho da iniciativa, o lançamento de um *Design Lab* e um grupo político de alto nível para estruturar sua governança, elegibilidade e operação.

O mecanismo busca alcançar os seguintes resultados:

- Mobilização de 10 vezes até 20 vezes em capital privado por dólar garantido.
- Redução substancial do custo de capital para os EMDE, com prazos mais longos e menor risco percebido.
- Transformação das garantias em instrumentos não dívida, por meio de desenho contratual inovador.
- Aumento do espaço fiscal para adaptação e perdas e danos, ao liberar recursos públicos hoje comprometidos com mitigação.
- Estímulo à criação de mercados locais, via coordenação com bancos nacionais, seguradoras e investidores institucionais.

6 O Brics é um agrupamento formado por 11 países-membros: Brasil, Rússia, Índia, China, África do Sul, Arábia Saudita, Egito, Emirados Árabes Unidos, Etiópia, Indonésia e Irã.

6. Desenho de um Mecanismo Suprassoberano de Garantias Climáticas (MSGC)

O redirecionamento maciço da poupança privada disponível nos países do Norte global, para o financiamento de investimentos de infraestrutura resiliente e de baixo carbono, nos países em desenvolvimento, requer a superação das barreiras a uma ampla utilização de garantias públicas – além da reforma dos organismos multilaterais de financiamento. No entanto, eliminar a exigência dos beneficiários e as emissores das garantias de fornecer contragarantias equivalentes a 100% de seu montante não pode se fazer por decreto. Esse nível de provisões visa a preservar a credibilidade financeira dos projetos, assegurando aos mercados de capitais que há recursos reservados para a cobertura de eventuais fracassos. Assim, ele só pode ser reduzido com a queda da taxa de risco dos investimentos.

A queda dessas taxas de risco depende de reformas "sistêmicas" que permitam redução da taxa de fracasso dos projetos, por meio de uma elevação da qualidade de sua elaboração e seleção, e também de forte capacidade dos garantidores de efetuar pagamentos rápidos e automáticos no caso de falência dos beneficiários dos empréstimos. É exatamente isso que permite um Mecanismo Suprassoberano de Garantias Climáticas (Hourcade *et al.*, 2024; 2025): um fundo de garantias públicas aportadas por um conjunto de países com nível de risco A, AA ou AAA, dispondo de capitais importantes. O MSGC sinaliza o compromisso desses países de reembolsar os empréstimos (no lugar do tomador inadimplente) nos montantes acima dos que possam ser absorvidos pelo fundo sem comprometer sua credibilidade financeira. Dessa forma, pode-se reduzir as provisões para o nível proporcional à taxa de inadimplência dos projetos (5% a 10% de garantias para taxas de fracasso tipicamente de 5% a 10%).

Para as instituições de intermediação financeira, operadores-chave a serem convencidos, a vantagem de um MSGC é a credibilidade política de um círculo virtuoso de confiança Norte-Sul com base em compromissos conjuntos dos Estados que os protegem de mudanças bruscas dos ciclos políticos dos países. Ele pode permitir aos conselhos de administração dos fundos de pensão a suspensão de sua prática de quase veto a investimentos em países em desenvolvimento, onde o risco-país se soma ao risco intrínseco, frequentemente percebido de forma exagerada, em um contexto de negócios menos familiar.

O potencial de um MSGC pode ser maximizado se ele for desenhado como uma plataforma de apoio a formas inovadoras e descentralizadas de parcerias público-privadas trabalhando com base nos mesmos princípios e, inclusive, com o apoio das instituições multilaterais de financiamento. Isso é essencial para apoiar conjuntos de empreendimentos de pequeno porte que não são captados pelo radar dos mercados financeiros, para mobilizar bancos locais e para definir *facilities*

específicas e formas inovadoras de repartição de riscos, evitando as críticas à burocratização e centralização de poder feitas às grandes instituições internacionais.

Tudo depende da qualidade da seleção dos projetos e da calibragem do nível das garantias fornecidas para evitar as suspeitas de arbitrariedades e minimizar os riscos de falha. Um MSGC não deve impor um método universal, mas estabelecer critérios básicos rigorosos a serem respeitados e organizar um processo de capitalização de sua experiência para aplicá-los a cada contexto, com base em dados científicos e modelos integrados. Trata-se de maximizar a *adicionalidade estatística* dos projetos e não de uma impossível avaliação precisa de cada projeto individualmente. Um efeito distributivo adicional pode ser obtido por meio da calibragem das garantias com base em um único valor global da tonelada de gases de efeito estufa evitada, favorecendo os países de baixa renda.

Para os países desenvolvidos, um MSGC tem a vantagem de maximizar a alavancagem de sua contribuição à descarbonização dos países em desenvolvimento. No contexto atual de severas restrições de gastos para o equilíbrio de suas finanças públicas, o fornecimento de garantias é mais vantajoso do que o de empréstimos em condições favorecidas, pois o aporte de recursos públicos é minimizado pela mobilização de capital privado – em um montante que pode ser 15 vezes superior, por exemplo. Além disso, o dispêndio de recursos públicos só ocorre no caso de fracasso dos projetos – taxas de falha são baixas, tipicamente da ordem de 5%. Ademais, seus orçamentos públicos também se beneficiam de receitas fiscais oriundas das exportações induzidas pelos projetos apoiados e das taxas pagas pelos projetos exitosos, como remuneração das garantias fornecidas.

Para os países em desenvolvimento, o MSGC representa um instrumento de não dívida, pois os libera do fornecimento de contragarantias. Isso lhes permite contornar a "muralha da dívida", fornecendo uma proteção contra os riscos de ingerência política e dos *lobbies* econômicos. Outra vantagem das garantias públicas é que elas cobrem uma ampla gama de riscos e, contrariamente aos seguros, o fazem desde o início das despesas de capital, permitindo superar a barreira do elevado dispêndio inicial que impede a realização de projetos economicamente viáveis. Nesse sentido, as garantias públicas são complementares a políticas de precificação de carbono que favorecem o custo nivelado de opções de baixo carbono, mas com uma penalização a opções de altas emissões de carbono muito tardias ao longo da vida útil do projeto.

De um ponto de vista global, atingir o nível de 1,3 trilhão de dólares anuais de transferências Norte/Sul torna-se mais acessível se transformado em 130 bilhões por ano de recursos públicos, mobilizando capital privado com uma alavancagem de 10 vezes (La Rovere; Hourcade, 2025). A primeira etapa para criação de um MSGC seria lançar na COP30 um *Design Lab* e um grupo político de alto nível para sua supervisão, capitalizando a imensa experiência de PDB, MDB, DFI e do GCF. Pode-se seguir uma fase-piloto, por meio de um sistema de adesão voluntária por parte de

países do Norte e do Sul que pode gerar uma emulação positiva à imagem do que vem ocorrendo com as Parcerias para Transição Energética Justa (JET-Ps) [do Inglês, *Partnerships for Just Energy Transitions*] – em andamento na África do Sul, no Vietnã, na Indonésia e no Senegal com apoio da União Europeia, do Reino Unido, da Alemanha, da França e do Japão, a despeito da retirada dos Estados Unidos. A médio e longo prazo, esse mecanismo pode vir a ampliar significativamente o fluxo Norte/Sul de capital para investimento em projetos resilientes de baixo carbono.

7. Conclusão

A transição climática justa e eficaz, em países em desenvolvimento, requer um redesenho ambicioso da arquitetura financeira internacional. Diante das limitações do financiamento público e da crescente urgência por investimentos em mitigação, adaptação e soluções baseadas na natureza, as garantias financeiras emergem como ferramentas estratégicas para mobilizar capital privado em escala e superar as barreiras estruturais que impedem o fluxo de recursos para onde são mais necessários.

Como demonstrado ao longo deste artigo, as garantias bem estruturadas têm o potencial de reduzir riscos percebidos, melhorar o perfil de crédito dos projetos e viabilizar investimentos que seriam considerados inviáveis sob condições de mercado tradicionais. Sua capacidade de alavancar múltiplos de capital privado por cada dólar público as torna instrumentos não apenas eficientes, mas imprescindíveis no atual cenário de escassez fiscal e urgência climática.

Apesar de sua eficácia comprovada, o uso de garantias, ainda, é limitado por entraves regulatórios, institucionais e operacionais. Superar essas barreiras exige reformas nos mandatos de bancos multilaterais, maior coordenação internacional, padronização de instrumentos e o fortalecimento de mecanismos de contabilização de mobilização de recursos. A mobilização de novos atores – como fundos filantrópicos, investidores de impacto e coalizões supranacionais – pode ser decisiva para ampliar a escala e o impacto dessas soluções.

O momento político atual é propício para a expansão do uso de garantias. Iniciativas recentes – como o *Green Guarantee Group*, a expansão do mandato da MIGA, a proposta do Brics Multilateral *Guarantee Mechanism* e o futuro Roteiro Baku-Belém – apontam para uma inflexão positiva rumo à institucionalização das garantias como pilares da nova arquitetura financeira do clima. A possível criação de um Mecanismo Suprassoberano de Garantias Climáticas pode consolidar esse movimento e oferecer o impulso necessário para uma nova era de investimentos climáticos em países em desenvolvimento.

Portanto, para alcançar as metas globais de clima e desenvolvimento, é urgente transformar as garantias de um instrumento promissor em uma política central, escalada e sistemática. Só assim será possível converter riscos em oportunidades, desbloquear o capital necessário e construir uma economia resiliente, inclusiva e sustentável para todos.

Referências

BRICS. Brasil 2025. **Guidelines on the BRICS multilateral guarantees (BMG).** 2025. Disponível em: *https://brics.br/en/documents/economy-finance-trade-and-infrastructure/2506_guidelines_bmg.pdf/@@download/file*

CLIMATE POLICY INITIATIVE – CPI. **Ferramentas para impulsionar o financiamento de soluções baseadas na natureza**. set. 2024. Disponível em: *https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2024/09/REL-Ferramentas-para-Impulsionar-o-Financiamento-de-SbN.pdf#page=58*

CLIMATE POLICY INITIATIVE – CPI. **Green guarantee group.** 2025. Disponível em: https://www.climatepolicyinitiative.org/green-guarantee-group/

INDEPENDENT HIGH-LEVEL EXPERT GROUP ON CLIMATE FINANCE – IHLEG. **Raising ambition and accelerating delivery of climate finance, Third report**. Nov. 2024. Disponível em: *https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/wp-content/uploads/2024/11/Raising-ambition-and-accelerating-delivery-of-climate-finance_Third-IHLEG-report.pdf*

HOURCADE, J. C. *et al.* **Towards a multi-sovereign guarantees mechanism for low carbon investments and climate resilience in developing countries**, T20 Brasil Mid-Term Conference Let's rethink the world, June 2024. Disponível em: *https://www.t20brasil.org/en/commentaries*

HOURCADE, J. C. *et al.* **A Climate finance initiative for COP 30:** A Multi-sovereign guarantee mechanism for accelerated climate investments in developing countries. Submission to the UNFCCC Baku to Belém Roadmap to 1.3 trillion. 2025. Disponível em: *https://unfccc.int/topics/climate-finance/workstreams/baku-to-belem-roadmap-to-1t#Submissions*

LA ROVERE, E. L.; HOURCADE, J. C. **COP 30:** SOS for Environment from Brazil. Published online on 23 May 2025 by Pluralia Opinions #21/25 in Italian, English, Russian and Chinese. Disponível em: *https://pluralia.com/en/o/cop30-sos-for-environment-from-brazil/*

Soluções baseadas na Natureza (SbN) nas cidades brasileiras: evidências para o fortalecimento de políticas públicas

Fabiana Wütrich[1], Raiza Gomes Fraga[2], Beatriz Vilela[3], Tatiana Maria Cecy Gadda[4]

Resumo

Com a emergência climática e a urbanização desconectada da natureza, as cidades buscam soluções mais sustentáveis. Uma estratégia que busca aliar a natureza na busca pela resiliência urbana chama-se Soluções baseadas na Natureza (SbN). Embora a estratégia seja nova, já há muitos casos de implementação de SbN no Brasil. Contudo, há a necessidade de um levantamento das SbN no país para melhor compreensão do potencial das SbN na promoção de cidades mais resilientes, sustentáveis e socialmente inclusivas. Este artigo analisou 20 estudos de caso de SbN em 18 municípios

Abstract

With the climate emergency and urbanization disconnected from nature, cities are seeking more sustainable solutions. One strategy that aims to ally with nature in the pursuit of urban resilience is Nature-based Solutions (NbS). Although the strategy is new, there are already many cases of NbS implementation in Brazil. However, there is a need for a survey of NbS in the country for a better understanding of their potential in promoting more resilient, sustainable, and socially inclusive cities. This article analyzed 20 NbS case studies in 18 Brazilian municipalities, revealing that the

1 Arquiteta e urbanista pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Ambiental Urbana pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba/PR.

2 Doutora e mestre em Desenvolvimento Sustentável pelo Centro de Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília (UnB), assessora técnica do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), Brasília/DF.

3 Bacharel em Ciência Política pela UnB, assessora técnica do CGEE, Brasília/DF.

4 Doutora em Ciências Ambientais Humanas e da Terra pela Universidade de Chiba; pós-doutorado no Programa Urbano do Instituto de Estudos Avançados da Universidade das Nações Unidas (UNU-IAS); mestre em Planejamento Físico pelo Royal Institute of Technology (KTH); professora na UTFPR, Curitiba/PR.

brasileiros, revelando que o setor público é o ator predominante, mas há uma necessidade de mais parcerias e financiamento inovador. A pesquisa também apontou a diversidade de soluções e a concentração regional, destacando a urgência de políticas públicas com base em evidências para corrigir essas desigualdades. Para isso, a governança colaborativa e o monitoramento são essenciais para expandir e institucionalizar as SbN no Brasil, promovendo a resiliência urbana.

Palavras-chave: Desafios sociais. Financiamento. Estudos de caso. Cidades. Governança urbana.

public sector is the predominant actor, but there is a need for more partnerships and innovative financing. The research also pointed to the diversity of solutions and regional concentration, highlighting the urgency of evidence-based public policies to correct these inequalities. For this, collaborative governance and monitoring are essential to expand and institutionalize NbS in Brazil, promoting urban resilience.

Keywords: *Societal challenges. Financing. Case studies. Cities. Urban governance.*

1. Introdução

Vivemos atualmente em um contexto de emergência ambiental e climática em escala global. A degradação de ecossistemas e a perda acelerada da biodiversidade, juntamente com eventos extremos resultantes das mudanças climáticas, como ondas de calor, tempestades severas e inundações, além do aumento do nível do mar, estão entre os principais desafios enfrentados pelas cidades (Frantzeskaki; Mcphearson, 2022).

Ao reconhecer as cidades como atores centrais, tanto na origem quanto na busca por soluções para esses desafios, entende-se que o planejamento e a gestão urbana, impulsionados por políticas públicas eficazes, precisa integrar estratégias que construam cidades sustentáveis e resilientes para o futuro (Bush; Doyon, 2019). Tais políticas são essenciais para guiar investimentos, regular o uso do solo, fomentar a inovação e engajar a sociedade na criação de um ambiente urbano mais equilibrado e preparado para os desafios que se apresentam.

No Brasil, o aumento dos eventos extremos também tem ocorrido. Nos últimos 30 anos, foram registrados mais de 20 mil episódios, quase 4 mil óbitos e cerca de 8,2 milhões de pessoas desalojadas ou desabrigadas devido a inundações, deslizamentos de terra e enxurradas. Segundo levantamento realizado em 2022 pela Secretaria Especial de Articulação e Monitoramento, ligado à Casa Civil da Presidência da República, cerca de 35% do total de municípios está vulnerável a condições climáticas extremas (Brasil, 2023). Diante desse cenário, é urgente a adoção de estratégias que busquem aliar a natureza na busca pela resiliência urbana, como as Soluções baseadas na Natureza (SbN).

O conceito de SbN pode ser definido como soluções inspiradas, apoiadas e/ou copiadas da natureza, que devem ser adaptadas às circunstâncias locais e abordar concomitantemente desafios sociais, ambientais e econômicos específicos de cada local, garantindo ganhos para a biodiversidade e bem-estar para a população. No entanto, para que as SbN sejam efetivamente integradas nas cidades, é necessário um esforço conjunto entre governos, sociedade civil e setor privado. A incorporação desse conceito em políticas públicas, programas e projetos urbanos é essencial para transformar os desafios atuais em oportunidades de inovação sustentável (Cohen-Shacham *et al.*, 2016).

O Observatório de Inovação para Cidades Sustentáveis (OICS), desenvolvido pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), busca contribuir com esse cenário ao promover o compartilhamento de conhecimentos, experiências e iniciativas que fomentem a sustentabilidade urbana. Ele fortalece a colaboração entre diferentes atores e incentiva o avanço de práticas sustentáveis em todo o País. O OICS possui atualmente um banco de soluções que contempla mais de 40 estratégias de SbN e 43 casos.

Por se tratar de um tema recente na esfera pública (municipal, estadual e federal), observa-se a necessidade de melhor compreender o potencial das SbN na promoção de cidades mais resilientes, sustentáveis e socialmente inclusivas. Levantamentos que indiquem o estágio atual de implementação dessas iniciativas no País são fundamentais (Frantzeskaki; Mcphearson, 2022). Diante disso, o presente artigo busca contribuir com essa lacuna de conhecimento ao apresentar 20 estudos de caso de SbN urbana, mapeados ao longo do ano de 2024, para compor a plataforma OICS. O objetivo é identificar os tipos de SbN aplicados em cidades brasileiras. Para tanto, foram utilizadas três estratégias distintas para mapear e selecionar os estudos de caso: i) pesquisa em literatura cinza; ii) convite direto para técnicos responsáveis pelo projeto; e iii) pesquisa secundária na internet.

2. Soluções baseadas na Natureza

O termo SbN surgiu em meados da década de 2000. Sua primeira definição, no entanto, emerge no contexto político no ano 2015 (Comissão Europeia, braço executivo da União Europeia) e, no ano seguinte, no contexto prático (União Internacional para a Conservação da Natureza). Reconhecendo a necessidade de uma definição universalmente[5] acordada sobre o conceito de SbN, a Assembleia das Nações Unidas para o Ambiente (Unea) [do Inglês, *United Nations Environment Assembly*] adotou uma definição oficial em 2022 (Quadro 1).

5 A Assembleia das Nações Unidas para o Meio Ambiente é composta por 193 estados-membro e reúne-se a cada dois anos para discutir avanços na agenda ambiental global. O tema da 5ª Assembleia foi "Fortalecer Ações pela Natureza para Alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável".

Quadro 1. Principais definições de Soluções baseadas na Natureza

Comissão Europeia (2015)	União Internacional para a Conservação da Natureza (Dumutri; Wendling, 2016)	Assembleia das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Unep, 2022)
"Ações inspiradas, apoiadas ou copiadas da natureza" [...], que buscam auxiliar a sociedade na resolução de diversos desafios ambientais, sociais e econômicos de maneira sustentável. [...] Devem ser adaptadas às condições locais de modo a garantir que sejam eficientes em termos de recursos e energia, assim como resilientes à mudança" (p. 24).	*"Ações para proteger, gerir de modo sustentável e restaurar ecossistemas naturais ou modificados para enfrentar desafios societários de modo eficiente e adaptativo, promovendo simultaneamente bem-estar humano e benefícios para a biodiversidade"* (p. 02).	*"Ações para proteger, conservar, restaurar, utilizar de forma sustentável e gerir ecossistemas terrestres, de água doce, costeiros e marinhos, naturais ou modificados, que visam a auxiliar no enfrentamento de desafios sociais, econômicos e ambientais de forma eficaz e adaptativa, proporcionando simultaneamente bem-estar humano, serviços ecossistêmicos, resiliência e benefícios para a biodiversidade"* (p. 13).

Fonte: Elaboração própria.

As definições de SbN da União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN) [do Inglês, *International Union for Conservation of Nature*] e da Comissão Europeia diferem principalmente na escala de atuação: enquanto a UICN adota uma abordagem global focada na proteção de ecossistemas naturais em larga escala – priorizando tipos 1 e 2 de SbN[6] e incluindo ecossistemas artificiais apenas para desafios específicos –, a Comissão Europeia concentra-se no contexto urbano, utilizando SbN como ferramentas para desenvolvimento sustentável, resiliência climática e geração de empregos verdes, com ênfase na criação de novos ecossistemas. Ambas reconhecem os benefícios ecossistêmicos e sociais das SbN, mas divergem no enfoque – conservação da biodiversidade – UICN – *versus* soluções urbanas integradas – União Europeia (UE).

A Unea avançou nas definições originais de SbN da Comissão Europeia e da UICN ao propor um conceito mais abrangente, incorporando ações, como proteger, gerir, restaurar, conservar e utilizar diversos ecossistemas – naturais ou modificados. Além disso, a definição da Unea destaca os principais elementos e salvaguardas necessários para garantir que as SbN abordem, de maneira eficaz, os diversos desafios societários enfrentados na atualidade, proporcionando concomitantemente benefícios para biodiversidade, bem-estar humano e auxiliando na construção de resiliência (Burgos; Rizzi; Davis, 2024).

Antes do surgimento do conceito de SbN, já existiam diversos outros conceitos com propósitos relacionados ao gerenciamento de recursos naturais e na melhoria dos serviços ecossistêmicos, o que levou a UICN (Cohen-Shacham *et al.*, 2016) a considerar SbN um termo guarda-chuva para abrigar essas diversas estratégias preexistentes. Contudo, o conceito de SbN tem sido cada vez mais reconhecido como capaz de contribuir para o enfrentamento de diversos outros problemas

6 Os tipos de SbN são apresentados no Quadro 2.

sociais, para além das questões relacionadas às mudanças climáticas e à perda de biodiversidade (Dunlop *et al.*, 2024). A União Internacional para a Conservação da Natureza (UICN, 2020) considera que as SbN podem auxiliar no enfrentamento de sete desafios sociais: i) mitigação e adaptação às mudanças climáticas; ii) redução de riscos de desastres; iii) desenvolvimento econômico e social; iv) saúde humana; v) segurança alimentar; vi) segurança hídrica; vii) reversão da degradação ambiental e perda da biodiversidade.

Por incluir diversas estratégias que podem ser implementadas em diferentes escalas, paisagens e contextos socioeconômicos e ambientais, Eggermont *et al.* (2015) propõem três tipologias de SbN considerando dois aspectos: i) a implementação de SbN modifica determinado ecossistema; e ii) a quantidade de serviços ecossistêmicos prestados e número de *stakeholders* beneficiados pela implementação de SbN (Quadro 2).

Quadro 2. Tipos de SbN, segundo nível de transformação dos ecossistemas

Tipologias	Foco	Descrição	Exemplos
Tipo 1	Conservação	Áreas com pouco ou nenhuma intervenção nos ecossistemas existentes, com o objetivo de proteger, manter ou mesmo melhorar a entrega de serviços ecossistêmicos já existentes na natureza.	Unidades de Conservação (UC).
Tipo 2	Restauração	Ações em áreas naturais ou degradadas com o objetivo de desenvolver protocolos para adoção de práticas produtivas sustentáveis, que promovam a biodiversidade, a conservação e a fertilidade do solo, da rotação de culturas e da provisão de serviços ecossistêmicos.	Agroflorestas; restauração de mananciais.
Tipo 3	Criação	Áreas com intervenções diretas nos ecossistemas, como restauração de áreas degradadas ou poluídas, ou mesmo a criação de novos ecossistemas, o que torna essa tipologia a mais visível entre as SbN.	Infraestrutura verde e azul; jardins de chuva; telhados verdes; ruas verdes.

Fonte: Adaptado de Eggermont et al. (2015).

O diferencial do conceito de SbN em relação aos demais conceitos preexistentes, como infraestrutura verde e adaptação baseada em ecossistemas, pode estar relacionado à inclusão de princípios e critérios relacionados à governança em seu arcabouço conceitual (Dumitri; Wendling, 2021).

Em contraste com as abordagens históricas de controle da natureza por meio de modelos de governança *top-down*, a governança ambiental contemporânea preconiza a implementação de modelos de planejamento colaborativos (Driessen *et al.*, 2012). A governança policêntrica e de cocriação, ao integrar amplo espectro de atores, demonstra maior eficácia na gestão de bens públicos (Sowińska-Świerkosz; García, 2022).

A governança de SbN é fundamental para garantir viabilização financeira (CE, 2023; Van Der Jagt *et al.*, 2023), assim como para assegurar o comprometimento municipal a longo prazo, para além dos ciclos políticos de quatro anos, ao ser incluída na política pública (Mendes *et al.*, 2020). Ainda, pode contribuir para a promoção de equidade socioeconômica ao incluir as partes interessadas ao longo do processo, especialmente em localidades onde persistem desigualdades (Sowińska-Świerkosz; García, 2022). O monitoramento contínuo da eficácia da governança em projetos de SbN permite aos tomadores de decisão urbanos identificar e mitigar pontos críticos, otimizando a integração equitativa dessas soluções e a consequente renaturalização das cidades (Van der Jagt *et al.*, 2023).

3. Uma estratégia emergente para o contexto brasileiro

A adoção das Soluções baseadas na Natureza nas políticas públicas brasileiras começou com a cooperação entre o Ministério da Ciência,Tecnologia e Inovação (MCTI) e a Comissão Europeia via projeto *Diálogos Setoriais* impulsionando iniciativas a partir de 2015. Apesar de o conceito ser recente, princípios de SbN já estavam presentes na legislação federal décadas antes, como no Código Florestal. O termo SbN ganhou força federal a partir de 2023, com sua inclusão em planos estratégicos – como o Novo PAC e as NDC – e foi consolidado na atualização do Plano de Adaptação às Mudanças Climáticas (Lei Federal nº 14.904/2024) (Brasil, 2024), que estabelece diretrizes para planos estaduais e municipais com foco em resiliência climática e redução de vulnerabilidades.

Além da legislação, o Executivo Federal lançou iniciativas, como o Programa Cidades Verdes e Resilientes, que integra SbN como eixo temático para fortalecer a resiliência urbana (Burgos; Rizzi; Davis, 2024). Em contraste, na esfera municipal, conceitos como infraestrutura verde e adaptação com base em ecossistemas já eram incorporados em políticas locais desde 2010 e 2015, respectivamente. Embora muitos planos climáticos municipais não tivessem força de lei, o terceiro setor, em parceria com o poder público, realizou iniciativas pontuais de SbN (Marques *et al.*, 2021). A partir de 2020, houve maior aderência ao termo SbN em planos de ação climática em capitais, como Recife, Fortaleza e Salvador.

Dada a recente incorporação do tema, ainda há grande necessidade de levantamentos sobre o estágio de implementação, arcabouço legal, instrumentos de financiamento e percepção de gestores e técnicos. Nesse contexto, o Observatório de Inovação para Cidades Sustentáveis (OICS) surge como ferramenta essencial, integrando ciência, tecnologia e gestão pública para apoiar a formulação de políticas baseadas em evidências. Essa abordagem é crucial para promover ações eficazes, transparentes e responsivas às necessidades sociais e ambientais urbanas, garantindo que as decisões políticas sejam fundamentadas em dados concretos e pesquisas científicas (Nutley; Walter; Davies, 2007; Head, 2016; Sanderson, 2002).

4. Metodologia

A presente pesquisa adotou o método de estudo de casos múltiplos (Yin, 2010) para analisar diversos projetos de SbN urbana no País. A seleção dos casos, orientada por três tipos distintos de fontes (literatura cinza, especialistas e dados secundários), busca garantir uma diversidade representativa, especialmente em termos geográficos, com exemplos de diferentes regiões do Brasil. As categorias de análise estabelecidas a partir do formulário desenvolvido para o primeiro levantamento de casos do OICS em 2018 são: i) desafios societários, ii) tipos de SbN, iii) atores envolvidos, iv) custo do investimento, e v) fase do estudo. Após a seleção, buscou-se contato direto com técnicos envolvidos em cada caso, e o formulário foi enviado àqueles que se dispuseram a contribuir. Para os casos sem retorno, as informações necessárias foram complementadas por meio de fontes secundárias, assegurando a obtenção de todos os dados necessários para a análise completa de todas as categorias. A Figura 1, a seguir, sintetiza os passos metodológicos adotados pela pesquisa.

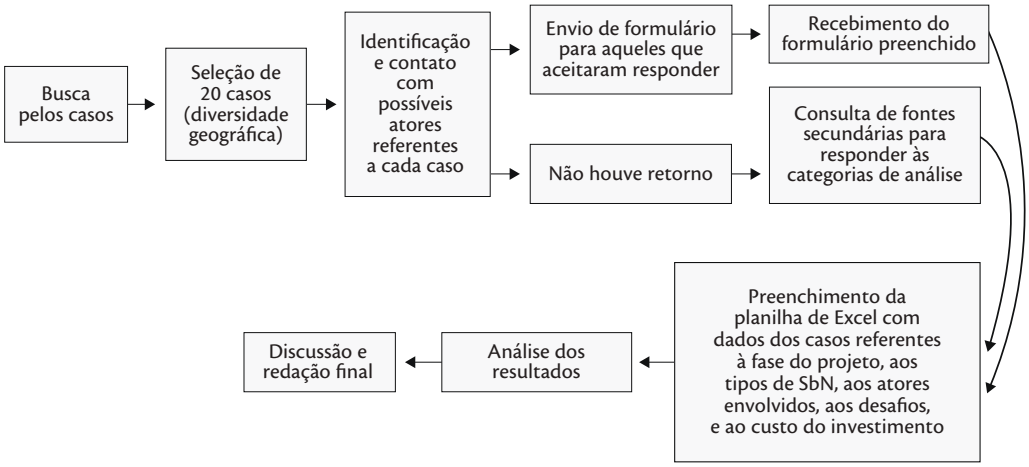


Figura 1. Passos metodológicos

Fonte: Elaboração própria.

Os dados coletados foram incluídos em uma planilha de Excel, que já continha todas as categorias de análise predefinidas. Posteriormente, foram elaborados gráficos e figuras para substanciar a análise dos dados. Por fim, realizou-se a discussão dos resultados encontrados e a redação final do artigo. A seguir, apresentamos os resultados.

5. Resultados

5.1. Localização dos estudos de caso

Os estudos de caso mapeados abrangem cidades de diferentes portes, perfis socioeconômicos e níveis de institucionalização de políticas ambientais, evidenciando a versatilidade das SbN frente a múltiplos desafios urbanos. A presença de projetos de SbN em grandes centros urbanos, como São Paulo, Belo Horizonte, Salvador, Niterói, Curitiba e Fortaleza, demonstra sua incorporação como alternativa viável às infraestruturas cinzas tradicionais, especialmente em temas relacionados à gestão hídrica e recuperação de áreas degradadas, por exemplo. Esses municípios dispõem de maior capacidade técnica e institucional, o que favorece o avanço para fases mais estruturadas de implementação e monitoramento das SbN (Figura 2).

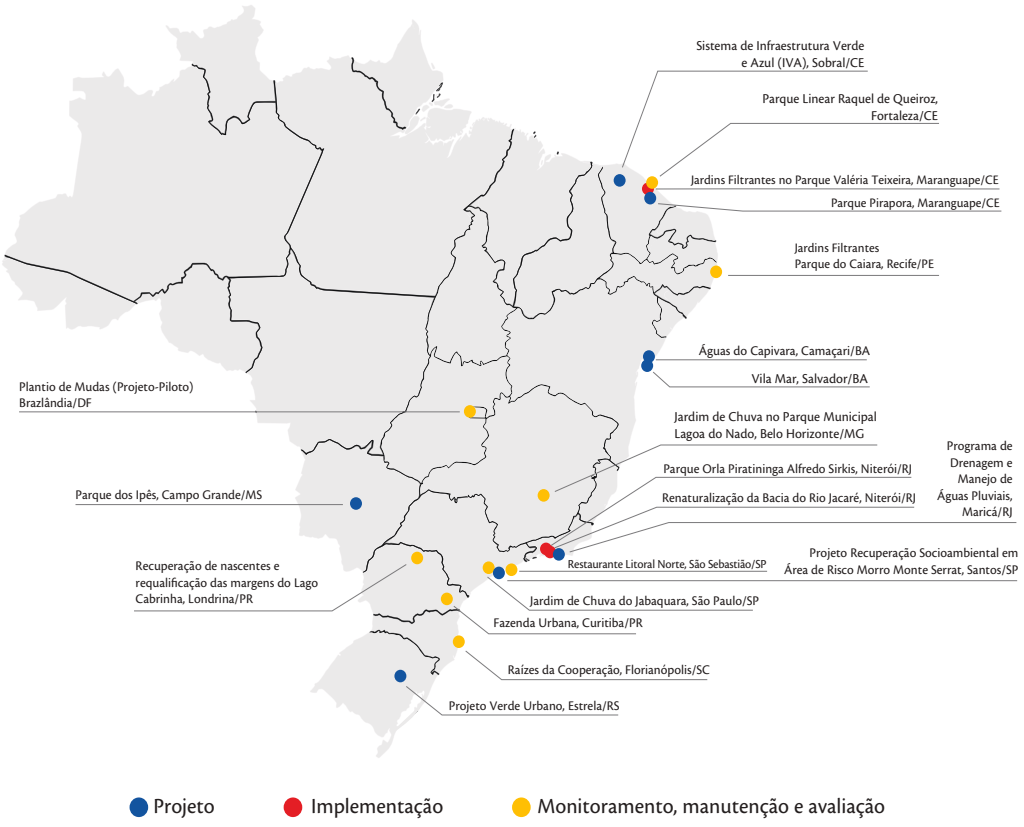


Figura 2. Mapa com os estudos de caso mapeados e a indicação do estágio do estudo em 2024

Fonte: Elaboração própria.

5.2. Tipos de SbN aplicados nos estudos de caso

A diversidade de tipologias encontradas nos estudos de caso evidencia a ampla gama de abordagens possíveis dentro do escopo das SbN. Os tipos mais recorrentes identificados foram parques urbanos e periurbanos (Parque do Ipês, em Campo Grande/MS; e POP, em Niterói/RJ, por exemplo), corredores ecológicos (Parque Pirapora, em Maranguape/CE; e Renaturalização da Bacia do Rio Jacaré, em Niterói/RJ), parques lineares (Raquel de Queiroz, em Fortaleza/CE, por exemplo), indicando forte ênfase em intervenções que combinam infraestrutura verde com acesso público, conectividade ecológica e multifuncionalidade urbana. Tais projetos não apenas promovem a melhoria da biodiversidade e do microclima local, como também contribuem diretamente para o bem-estar das populações urbanas.

Soluções amplamente adotadas e relacionadas à gestão hídrica incluem: os jardins de chuva (Jabaquara/SP e Belo Horizonte/MG), biovaletas (Projeto Vila Mar, em Salvador/BA e Projeto Verde Urbano, em Estrela/RS, por exemplo), alagados construídos ou jardins filtrantes (POP, Niterói/RJ, Parque Linear Raquel de Queiroz, em Fortaleza/CE, Programa de Drenagem e Manejo Sustentável de Águas Pluviais do Município de Maricá/RJ, Jardins Filtrantes no Parque do Caiara, no Recife/PE, e Jardins Filtrantes no Parque Valéria Teixeira, em Maranguape/CE, por exemplo), e o emprego da técnica de fitorremediação (Parque Linear Raquel de Queiroz, em Fortaleza/CE, Renaturalização da Bacia do Rio Jacaré, em Niterói/RJ, por exemplo). A recomposição de mata ciliar também é empregada em diversos estudos (por exemplo, no Projeto Águas do Capivara, Camaçari/BA, na Renaturalização da Bacia do Rio Jacaré, Niterói/RJ, e na Lagoa Cabrinha, em Londrina/PR). Essas estratégias refletem a crescente preocupação tanto com a gestão das águas urbanas, quanto com a prevenção de enchentes, questões sistêmicas enfrentadas pelas cidades brasileiras (Mendes; Pina, 2023).

A presença de soluções voltadas à restauração ecológica – incluindo conservação e/ou criação de ecossistemas costeiros e estuarinos (Projeto Raízes da Cooperação, em Florianópolis/SC) e reflorestamento de encostas (Restaura Litoral Norte, em São Sebastião/SP) – indica a valorização de práticas que conciliam regeneração ambiental com benefícios sociais e econômicos.

Por fim, soluções menos frequentes encontradas entre os casos incluem: sistemas agroflorestais (Projeto de Recuperação Socioambiental em área de risco no Monte Serra, em Santos/SP), renaturalização de rios (Bacia do Rio Jacaré, em Niterói/RJ) e hortas urbanas (Fazenda Urbana, em Curitiba/PR, e Projeto Vila Mar, em Salvador/BA, por exemplo).

5.3. Desafios mapeados

Os estudos de caso foram mapeados com base nos desafios sociais estabelecidos pela IUCN (2020), refletindo as prioridades ambientais e sociais contemporâneas das cidades brasileiras, que buscam soluções que contribuam simultaneamente para diversos desafios (Gráfico 1). O desafio presente em todos os estudos de caso é a "mudança climática e aumento da resiliência". Isso reforça o papel central de atuação das SbN desde os primórdios da utilização do termo ainda sem um conceito definido (Mackinnon *et al.*, 2008; UICN, 2009).



Gráfico 1. Desafios mapeados nos estudos de caso

Fonte: Elaboração própria.

Na sequência, destacam-se, com frequência similar, os desafios de "reversão da degradação ambiental e perda da biodiversidade" (n=14), "saúde humana" (n=13) e "segurança hídrica" (n=13). Essa constatação revela a busca por soluções integradas que associam benefícios ecológicos e sociais, contribuindo tanto para a melhoria ambiental quanto para o bem-estar humano. A preocupação com a qualidade dos recursos naturais, especialmente frente à poluição urbana e à degradação de corpos hídricos, é evidente (POP, Niterói/RJ; Parque Pirapora, Maranguape/CE; Jardins Filtrantes no Parque Caiara, Recife/PE, por exemplo). Nesse contexto, a criação e/ou a requalificação de áreas verdes, por exemplo, têm sido reconhecidas como mecanismo multifuncional que promove lazer, saúde mental, conforto térmico e interação comunitária (Dunlop *et al.*, 2024).

O desafio relacionado ao "desenvolvimento econômico e social'" segue logo abaixo, sendo endereçado em 12 estudos de caso que focam especialmente na cocriação dos projetos (POP, Niterói/RJ; Renaturalização da Bacia do Rio Jacaré, Niterói/RJ; Parque dos Ipês, Campo Grande/MS; por

exemplo), na ação comunitária (Plantio de Mudas; Restaura Litoral Norte; Raízes da Cooperação, por exemplo) e na educação ambiental (Fazenda Urbana; Lago Cabrinha, por exemplo).

Já o estabelecimento de relação direta entre a implementação de SbN e a "redução de riscos de desastres" é indicada em oito estudos de caso (Projeto Vila Mar, Salvador/BA; Restaura Litoral Norte, São Sebastião/SP; Projeto de Recuperação Socioambiental em área de risco no Monte Serra, em Santos/SP; Renaturalização da Bacia do Rio Jacaré, Niterói/RJ; Projeto Verde Urbano, Estrela/RS; por exemplo).

Apesar da predominância desses grandes temas, há apenas menções pontuais ao desafio relacionado à "segurança alimentar" (Fazenda Urbana, Curitiba/PR; Projeto Vila Mar, Salvador/BA; Projeto de Recuperação Socioambiental em área de risco no Monte Serra, em Santos/SP). Ainda que igualmente relevante e necessário ao contexto nacional, o tema permanece pouco incorporado como possível cobenefício das SbN implementadas. Isso pode refletir a falta de diretrizes claras ou de capacidade técnica para abordá-lo de forma estruturada.

5.4. Atores envolvidos nos estudos de caso

A implementação de SbN demanda a articulação entre diversos setores da sociedade (Gráfico 2). A interação entre cientistas, gestores públicos, sociedade civil e setor privado não apenas enriquece o processo decisório, como também amplia as possibilidades de soluções integradas e contextualizadas aos territórios urbanos (Sarabi *et al.*, 2019).

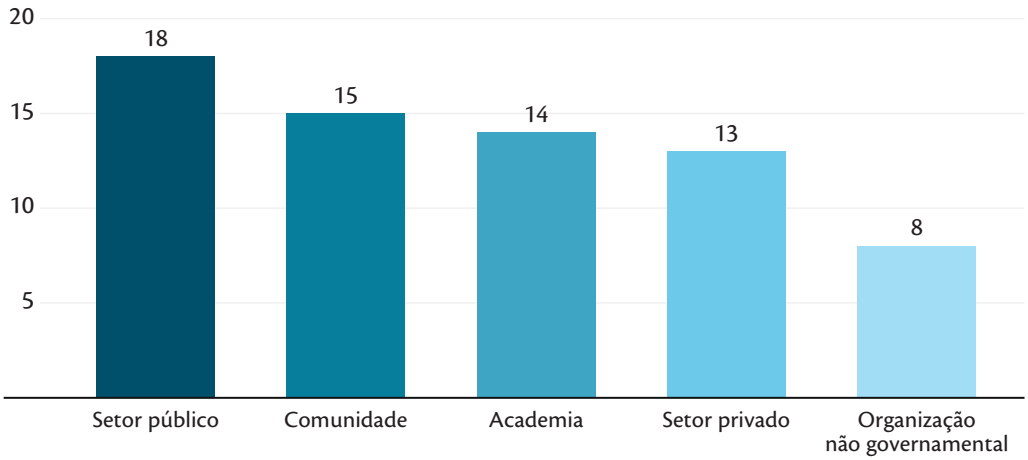


Gráfico 2. Distribuição da participação de atores nos estudos de caso

Fonte: Elaboração própria.

Nos estudos de caso mapeados ao longo de 2024, observa-se clara preponderância do setor público na liderança e na coordenação das iniciativas analisadas. Esse protagonismo das instituições governamentais evidencia tanto a responsabilidade legal quanto a capacidade de articulação intersetorial e financiamento de políticas públicas voltadas à sustentabilidade urbana.

Na sequência, destaca-se a atuação da sociedade, que tem contribuído significativamente para a disseminação e a operacionalização das SbN no País. Sua presença ativa reforça o caráter participativo dessas soluções, sobretudo em contextos marcados por vulnerabilidades socioambientais. A colaboração com a academia também merece destaque, uma vez que pode oferecer fundamentação científica, metodologias de avaliação e monitoramento, além de suporte à inovação e à capacitação técnica dos demais atores envolvidos. Embora o setor privado tenha participação um pouco mais tímida nos casos analisados, sua inclusão é estratégica para a escalabilidade e sustentabilidade financeira dessas iniciativas (Brasil-Leigh *et al.*, 2024).

Embora as organizações não governamentais estejam pouco representadas nesta amostra, seu papel é fundamental na divulgação e promoção das SbN. Um exemplo de apoio à estruturação de projetos de SbN é o programa Acelerador de SbN em Cidades, que inclui seis dos estudos de caso mapeados (Parque dos Ipês, Campo Grande/MS; Parque Pirapora, Maranguape/CE; Projeto Águas do Capivara, Camaçari/BA; Projeto de Recuperação Socioambiental em área de risco no Monte Serra, Santos/SP; Projeto Verde Urbano, Estrela/RS; e Sistema de Infraestrutura Verde e Azul, Sobral/CE). Liderado pelo WRI Brasil, com apoio técnico da Fundação Grupo Boticário de Proteção à Natureza e financiamento da Caterpillar Foundation e do Ministério do Meio Ambiente, Alimentação e Assuntos Rurais do Reino Unido (Defra UK), este programa de mentoria e capacitação impulsiona o potencial de implementação e viabilidade de projetos de SbN em diversas fases de maturidade, complementando, assim, os esforços de promoção dessas soluções (Horn *et al.*, 2024).

5.5. Faixa de valor dos estudos de caso mapeados

Os dados de investimento revelam ampla variação nos aportes financeiros destinados à implementação dos estudos de caso mapeados, evidenciando que projetos de SbN podem ser viabilizados tanto com investimentos mais robustos quanto com recursos modestos. A maioria dos casos (35%) contou com aportes acima de 5 milhões de reais, demonstrando a existência de iniciativas de grande escala, vinculadas a programas estruturantes, requalificação urbana ou intervenções de infraestrutura verde em larga escala.

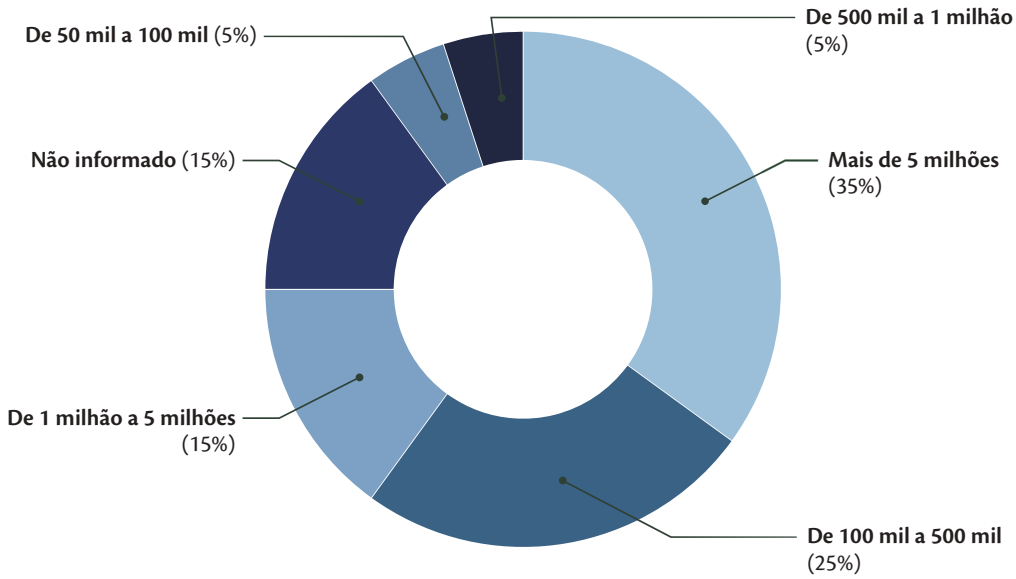


Gráfico 3. Faixa de valor investido para os estudos de caso mapeados

Fonte: Elaboração própria.

Em seguida, 25% dos projetos receberam investimentos na faixa de 100 mil a 500 mil reais, sinalizando a viabilidade de ações de médio porte, com impacto localizado, como hortas comunitárias, parques urbanos e pequenos sistemas de drenagem sustentável. Já 15% dos casos operaram com recursos entre 1 milhão e 5 milhões de reais, mesma proporção daqueles em que os valores não foram informados, o que limita a compreensão da escala de parte das iniciativas. Investimentos menores, entre 500 mil e 1 milhão de reais, e entre 50 mil e 100 mil reais, aparecem em apenas 5% dos casos cada, sugerindo que, embora existam projetos com menor aporte, eles representam uma minoria entre os mapeados.

Os estudos de caso mapeados evidenciam ampla gama de fontes de financiamento, sendo a liderança na alocação de recursos oriunda de diferentes esferas governamentais, como o governo federal e os governos municipais. Além disso, órgãos como o Ministério Público Federal (MPF) e o Ministério Público de São Paulo (MPSP) também estão entre os financiadores, destacando o papel da justiça ambiental no contexto das SbN. O setor privado, embora ainda de maneira tímida, é visto como crucial para a escalabilidade desses projetos. Por fim, organismos e governos internacionais, como a Corporação Andina de Fomento (CAF), também foram apontados na amostra.

6. O que as cidades brasileiras ensinam sobre soluções baseadas na natureza: evidências e caminhos para políticas públicas

As experiências municipais com implementação de SbN fornecem evidências importantes para a formulação de políticas públicas. A análise dos 20 casos mapeados pelo Observatório de Inovação para Cidades Sustentáveis destaca a abordagem multifuncional e a articulação institucional como elementos importantes para a efetividade das iniciativas. A partir dos casos analisados, o caráter multifuncional do conceito de SbN (Kabisch *et al.*, 2022) é reforçado considerando que 75% dos projetos integram três ou mais objetivos, por meio da implementação de uma iniciativa, como, por exemplo, a implementação de iniciativas de drenagem sustentável (biovaletas, jardins de chuva) oferece espaços de recreação pública, melhoria da saúde física e mental, além de promover melhoria para a biodiversidade.

Isso demonstra o caráter integrado desse tipo de abordagem (Kabisch *et al.*, 2022), ao mesmo tempo em que se destaca enquanto estratégia para o enfrentamento dos efeitos das mudanças climáticas no ambiente urbano (Cohen-Shacham *et al.*, 2016). A variedade de soluções implementadas – como parques urbanos, corredores ecológicos, jardins de chuva, reflorestamento de encostas, restauração de matas ciliares e de ecossistemas costeiros – demonstra que SbN podem ser aplicadas em múltiplos contextos, promovendo benefícios integrados para biodiversidade, microclima, bem-estar e segurança hídrica, fortalecendo a perspectiva de que políticas públicas sobre SbN devem incentivar a adoção de soluções multifuncionais e integradas.

Em todos os casos mapeados, o desafio de "adaptação climática" esteve presente por meio de ações para redução de enchentes ou regulação microclimática. Em 85% dos casos, houve a menção ao desafio de "qualidade de vida" associando espaços verdes à melhoria da saúde mental e física. E a menção ao desafio da "segurança hídrica" como medida de recarga de aquíferos e controle de erosão em nascentes foi identificada em 65% dos casos.

Soluções inovadoras, como fitorremediação e renaturalização de rios, mostraram potencial, mas enfrentaram desafios técnicos e institucionais para implementação em maior escala. O fortalecimento da capacitação técnica e a simplificação de processos institucionais são lições importantes para ampliar o uso de SbN.

Em termos de governança, os casos mapeados envolvem múltiplas secretarias municipais (como as de Meio Ambiente, Urbanismo, Saúde), o que demonstra a necessidade de estruturas governamentais integradas para a implementação dessas ações no âmbito de políticas públicas. Da mesma forma, a combinação de recursos públicos, privados de fundos internacionais e as

doações foram formatos essenciais para a implementação de iniciativas, reforçando a necessidade de construção de mecanismos inovadores de financiamento que incluam parcerias entre setor público e privado. A atuação das organizações sociais tem contribuído para a disseminação.

Outro ponto crucial para o contexto brasileiro é a desigualdade regional. Há uma concentração dos casos analisados nas Regiões Sul, Sudeste e Nordeste, permanecendo uma baixa representatividade de casos no Centro-Oeste e ausência no Norte do País. Isso sugere a necessidade de pensar políticas públicas que reduzam as assimetrias regionais, promovendo capacitação técnica e financiamento direcionado para impulsionar/promover a implementação de projetos de SbN nessas regiões.

A ausência de regulamentação específica e a dificuldade de acesso a financiamento foram barreiras recorrentes. A criação de instrumentos legais e financeiros dedicados às SbN pode facilitar sua expansão e institucionalização nas políticas públicas. A distribuição da faixa de valor dos estudos de caso evidencia que, embora haja espaço para projetos de baixo custo, a maior parte das SbN analisadas demanda planejamento estruturado e recursos consideráveis. Isso reforça a importância de mecanismos de financiamento específicos e da inclusão das SbN nos orçamentos públicos e privados, como estratégia para garantir sua implementação em maior escala.

Fortalecer parcerias público-privadas e criar mecanismos de incentivo pode ampliar a participação empresarial e fomentar novos arranjos institucionais e modelos de negócio baseados na natureza. Em síntese, os dados do mapeamento refletem um modelo ainda centrado na ação do Estado, mas com crescente engajamento de outros setores. Isso indica um caminho promissor para o fortalecimento de uma governança colaborativa, capaz de promover transformações urbanas sustentáveis e inclusivas, em consonância com a proposta do OICS de estimular a comunicação dialógica e a cocriação de soluções entre múltiplos atores.

A sistematização de experiências em SbN é etapa fundamental para compreender as particularidades da implementação dessas iniciativas no contexto brasileiro. Esse processo fornece subsídios valiosos para a tomada de decisão baseada em evidências, contribuindo diretamente para o aprimoramento de políticas públicas. Além de orientar formuladores de políticas, o mapeamento de iniciativas em SbN também evidencia a importância de incorporar, de forma consistente, as etapas de monitoramento e avaliação nos projetos. A etapa de monitoramento e avaliação é essencial para verificar se os objetivos foram alcançados, mensurar os impactos gerados e adaptar estratégias conforme necessário, garantindo maior eficácia e sustentabilidade das ações. Nesse contexto, centros de pesquisa e organizações da sociedade civil desempenham papel estratégico, contribuindo com conhecimento técnico e metodológico para fortalecer a implementação das SbN no Brasil e, assim, impulsionar a formulação de políticas públicas mais eficazes e integradas.

7. Considerações finais

O mapeamento de experiências recentes de projetos de SbN, na escala municipal, reafirma o caráter multifuncional e integrado dessas abordagens, em relação às tradicionais infraestruturas cinzas, demonstrando-se essenciais para enfrentar os diversos desafios urbanos interconectados enfrentados pelas cidades brasileiras. As diversas aplicações, desde jardins de chuva até a restauração de ecossistemas, demonstram o potencial das SbN em múltiplos contextos, gerando benefícios ambientais, sociais e econômicos. Para impulsionar a implementação e a escala dessas iniciativas, é crucial superar barreiras institucionais e financeiras, investindo na capacitação técnica, na simplificação de processos e na criação de instrumentos legais e financeiros específicos. A promoção de uma governança colaborativa, com a participação ativa de múltiplos atores (público, privado e sociedade civil), e a busca por mecanismos inovadores de financiamento são fundamentais. Além disso, é imperativo endereçar as assimetrias regionais no Brasil, direcionando políticas e recursos para as regiões menos representadas. Por fim, a sistematização, o monitoramento e a avaliação contínuos dessas experiências – afinal, são experiências vivas! – são etapas cruciais para subsidiar políticas públicas baseadas em evidências, garantindo a eficácia e a sustentabilidade das SbN e, consequentemente, impulsionando a construção de cidades mais resilientes e inclusivas.

8. Limitações da pesquisa

A presente pesquisa adota o método de estudo de casos múltiplos para mapear e analisar especificamente 20 estudos de caso de SbN urbano. Longe de limitar os achados, essa abordagem estratégica permite uma análise aprofundada de um conjunto representativo de experiências, selecionadas por diversos critérios, como diversidade geográfica e desafios enfrentados. A profundidade obtida por essa seleção criteriosa possibilita a identificação de padrões emergentes, desafios comuns, fatores de sucesso e lições aprendidas que seriam menos evidentes em análises mais amplas e superficiais. Assim, os *insights* gerados são robustos e altamente relevantes para a compreensão do panorama atual das SbN urbanas no País, focando na representatividade qualitativa em vez de uma exaustividade quantitativa.

9. Agradecimentos

As autoras gostariam de agradecer aos técnicos das prefeituras de diversos municípios, aos profissionais do setor privado e do terceiro setor que se dispuseram a responder ao formulário e

retornar, em tempo, para a elaboração deste artigo. Fabiana Wütrich também gostaria de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo suporte para esta pesquisa por meio da Bolsa de Doutorado nº 88887.902473/2023-00.

Referências

BRASIL. Presidência da República. **Atualização dos critérios e indicadores para a identificação dos municípios mais suscetíveis à ocorrência de deslizamentos, enxurradas e inundações para serem priorizados nas ações da União em gestão de risco e de desastres naturais**. Nota técnica nº 1/2023/SADJ-VI/SAM/CC/PR. Brasília: Secretaria Especial de Articulação e Monitoramento, set. 2023. Disponível em: *https://educacao.cemaden.gov.br/wp-content/uploads/2024/04/NotaTcnica12023SADJVISAMCCPR_SEI_00042.000497_2023_74.pdf*

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 14.904, de 27 de junho de 2024.** Estabelece diretrizes para a elaboração de planos de adaptação à mudança do clima; altera a Lei nº 12.114, de 9 de dezembro de 2009; e dá outras providências. 2024. Disponível em: *https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=14904&ano=2024&ato=fecoXRE5ENZpWT97f*

BRASIL-LEIGH, Amanda; BYRD, Rosaly; KAFER, Phillipe; et al. **Ferramentas para Impulsionar o Financiamento de Soluções Baseadas na Natureza.** Climate Policy Initiative & Instituto Clima e Sociedade, 2024. 75 p. Disponível em: *https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2024/09/REL-Ferramentas-para-Impulsionar-o-Financiamento-de-SbN.pdf*

BURGOS, N.; RIZZI, D.; DAVIS, M. **Bridging continents.** exploring the state-of-play of nature-based solutions in the EU and LAC: Building a foundation for collaboration. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Publications Office of the European Union, 2024. Disponível em: *https://www.ecologic.eu/sites/default/files/publication/2024/50173-bridging-continents.pdf*

BUSH, J.; DOYON, A. Building urban resilience with nature-based solutions: How can urban planning contribute? **Cities,** v. 95, p. 102483, 2019. Disponível em: *https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275119313976*

CASTALDO, Anna Giulia; NOCENTINI, Margherita Gori; OLIVEIRA, Fabiano Lemes de; MAHMOUD, Israa H. Nature-based solutions and urban planning in the Global South: Challenge orientations, typologies, and viability for cities. **Land Use Policy,** v. 150, p. 107439, 2025. Disponível em: *https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107439.*

COHEN-SHACHAM, E. *et al*. Nature-based solutions to adress global societal challenges. **International Union for Conservation of Nature**, Gland, Switzerland, v. 97, p. 2016-2036, 2016. Disponível em: *https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2016-036.pdf*

COMISSÃO EUROPEIA – CE. **Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities**: final report of the Horizon 2020 expert group on 'Nature-based solutions and re-naturing cities'. Publications Office, 2015. Disponível em: *doi/10.2777/479582*

COMISSÃO EUROPEIA – CE. **Guidelines for co-creation and co-governance of nature-based solutions**: insights form EU-funded projects. Ferreira, I.; Lupp, G.; Mahmoud, I. (Eds.). Publications Office of the European Union, 2023. Disponível em: *https://data.europa.eu/doi/10.2777/157060*

DUNLOP, T. *et al.* The evolution and future of research on Nature-based Solutions to address societal challenges. **Communications Earth & Environment**, v. 5, n. 132, 2024. Disponível em: *https://www.nature.com/articles/s43247-024-01308-8.pdf*

DUMITRU, A.; WENDLING, L. (Eds.). **Evaluating the Impact of Nature-based Solutions: A Handbook for Practitioners**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. Disponível em: *https://op.europa.eu/s/y58q*

EGGERMONT, H. *et al.* Nature-based solutions: new influence for environmental management and research in Europe. **GAIA-Ecological perspectives for science and society**, v. 24, n. 4, p. 243-248, 2015. Disponível em: *https://doi.org/10.14512/gaia.24.4.9*

FRANTZESKAKI, N.; McPHEARSON, T. Mainstream nature-based solutions for urban climate resilience. **BioScience,** v. 72, n. 2, 2022. p. 113-115. Disponível em: *https://academic.oup.com/bioscience/article-pdf/72/2/113/42843138/biab105.pdf*

HEAD, B. W. Toward more "evidence-informed" policy making? **Public Administration Review**, v. 76, n. 3, p. 472–484. 2016. Disponível em: *https://www.researchgate.net/profile/Brian-Head-2/publication /284281544_Toward_More_Evidence-Informed_Policy_Making/links/58c92e05a6fdcc63aa9680bb/Toward-More-Evidence-Informed-Policy-Making.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2FoaW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2FoaW9uIn19*

HERZOG, C.P.; ROZADO, C.A. **Diálogo Setorial UE-Brasil sobre soluções baseadas na natureza:** Soluções baseadas na natureza para cidades resilientes: da investigação à inovação e à execução. 2019. Disponível em: *https://www.researchgate.net/profile/Cecilia-Herzog/publication/343319925_Solucoes_baseadas_na_Natureza_-_Brasil-Europa/links/5f22f8dd299bf13404930025/Solucoes-baseadas-na-Natureza-Brasil-Europa.pdf*

HORN, L.; TORNELLO, V. T.; ARIOLI, M.; CORRÊA, F.; AZEREDO, L. **Acelerando soluções baseadas na natureza em cidades brasileiras:** Lições aprendidas na estruturação de projetos em estágio de ideação. Nota Prática. São Paulo: WRI Brasil, 2024. Disponível em: *https://www.wribrasil.org.br/form/download-publication?source_entity_type=node&source_entity_id=100386*

JAGT, A. P. N. van der *et al.* **With the process comes the progress**: A systematic review to support governance assessment of urban nature-based solutions. Urban Forestry & Urban Greening, p. 01-20, 2023. Disponível em: *https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128067*

KABISCH, N. *et al.* Principles for urban nature-based solutions. **Ambio,** v. 51, n. 6, p. 1388-1401, 2022. *https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-021-01685-w*

MACKINNON, K. *et al.* **Biodiversity, climate change, and adaptation: nature-based solutions from the World Bank portfolio**. The World Bank, 2008. Disponível em: *https://documents.worldbank.org/pt/publication*

MARQUES, T.H.N. *et al.* Nature-based Solutions: conceptualization, applicability and complexity in the Latin American context, cases of Brazil and Peru. **Revista LABVERDE**, Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Departamento de Projeto. LABVERDE – Laboratório Verde, v. 11, n. 1, p. 12-49. São Paulo: FAUUSP, 2021. Disponível em: *https://www.revistas.usp.br/revistalabverde/issue/view/12194*

MENDES, Maria Estela Ribeiro; PINA, Silvia Aparecida Mikami Gonçalves. Soluções Baseadas na Natureza para gestão de águas urbanas: aplicação de jardins filtrantes, jardins de chuva e biovaletas. **Revista Foco**, v. 16, n. 3, 2023. Disponível em: *https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/1382/1006*

MENDES, R. *et al.* The institutionalization of nature-based solutions—a discourse analysis of emergent literature. **Resources**, v. 9, n. 1, p. 6, 2020. Disponível em: *https://doi.org/10.3390/resources9010006*

NUTLEY, S.M.; WALTER, I.; DAVIES, H.T.O. **Using evidence**: how research can inform public services. Policy Press. 2007. DOI:10.56687/9781847422323

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE - UNEA. **Nature-based solutions for supporting sustainable development.** United Nations Environment Assembly Resolution UNEP/EA.5/Res.5. Disponível em: *https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/39864/NATURE-BASED%20SOLUTIONS%20FOR%20SUPPORTING%20SUSTAINABLE%20DEVELOPMENT.%20English.pdf?sequence=1&isAllowed=y%20short%20link%20for%20UNEA%20definition*

SANDERSON, I. Evaluation, policy learning and evidence-based policy making. **Public Administration**, v. 80, n. 1, p. 1–22, 2002. Disponível em: *https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1467-9299.00292*

SARABI, S.E. *et al.* Key enablers of and barriers to the uptake and implementation of nature-based solutions in urban settings: A review. **Resources**, v. 8, n. 3, p. 121, 2019. Disponível em: *https://www.mdpi.com/2079-9276/8/3/121.*

SOWIŃSKA-ŚWIERKOSZ, B.; GARCÍA, J. What are Nature-based solutions (NBS)? Setting core ideas for concept clarification. **Nature-Based Solutions**, v. 2, p. 100-109, 2022. Disponível em: *https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772411522000015*

UNIÃO INTERNACIONAL PARA A CONSERVAÇÃO DA NATUREZA – IUCN. No time to lose: Make full use of nature-based solutions in the post-2012 climate change regime. In: **Position Paper on the Fifteenth Session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on**

Climate Change (COP 15). Gland, Switzerland: International Union for Conservation of Nature, 2009. p. 1-5. Disponível em: *www.iucn.org*

UNIÃO INTERNACIONAL PARA A CONSERVAÇÃO DA NATUREZA – IUCN. **Guidance for using the IUCN Global Standard for Nature-based Solutions.** A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of Nature-based Solutions. First edition. Gland, Switzerland: IUCN. IUCN, Gland, Switzerland 2020. *https://portals.iucn.org/library/node/49071UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL*

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME – UNEP. **Resolution on environmental sustainability:** nature-based solutions for supporting sustainable development. Nairobi: United Nations Environmental Programme, 2022. Disponível em: *https://docs.un.org/en/A/RES/77/168*

WATKINS, G.G. et al. Nature-based solutions: scaling private sector uptake for climate resilient infrastructure in Latin America and the Caribbean. **Inter-American Development Bank**, 2019. Disponível em: *https://publications.iadb.org/publications/english/document/Nature-based_Solutions_Scaling_Private_Sector_Uptake_for_Climate_Resilient_Infrastructure_in_Latin_America_and_the_Caribbean.pdf*

YIN, R.K. **Estudo de Caso**: Planejamento e Métodos. 4. ed. São Paulo: Bookman, 2010. Disponível em: *http://maratavarespsictics.pbworks.com/w/file/fetch/74304716/3-YIN-planejamento_metodologia.pdf*

A crítica da inteligência artificial sustentável

Pedro Ivo Ferraz da Silva[1]

Resumo

O artigo examina criticamente a relação entre o avanço da inteligência artificial (IA) e o desenvolvimento sustentável. Analisa-se como o crescimento acelerado da IA tem gerado impactos ambientais significativos, como o aumento no consumo de energia, água e matérias-primas, ao mesmo tempo em que essa tecnologia é apresentada como solução para desafios climáticos e sociais. Discute-se, ainda, o papel ambivalente da IA nas dimensões social e econômica, com destaque para desigualdades globais, riscos de discriminação algorítmica e concentração de benefícios. Por fim, propõe-se uma abordagem inspirada nos modelos de inovação frugal, centrada na eficiência, na endogeneidade e na finalidade pública, como alternativa para construir uma trajetória de IA genuinamente sustentável, especialmente no contexto do Sul Global.

Abstract

This article critically examines the relation between the advancement of Artificial Intelligence (AI) and sustainable development. It analyzes how the accelerated growth of AI has led to significant environmental impacts–such as increased consumption of energy, water, and raw materials–while simultaneously being presented as a solution to climate and social challenges. The article also discusses the ambivalent role of AI in the social and economic dimensions, with emphasis on global inequalities, algorithmic discrimination risks, and the concentration of benefits. Finally, it proposes an approach inspired by frugal innovation models, centered on efficiency, endogeneity, and public purpose, as an alternative to build a genuinely sustainable AI trajectory, especially in the context of the Global South.

1 Diplomata e coordenador de assuntos científicos e tecnológicos no Departamento de Clima do Itamaraty. É membro do Comitê Executivo de Tecnologia da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) [do Inglês, *United Nations Framework Convention on Climate Change*] e cofundador da *Innovation and Science Diplomacy School (InnSciD)*, SP. É engenheiro e filósofo formado pela Universidade de São Paulo (USP), com experiência internacional em ciência, tecnologia e inovação.

Palavras-chave: Inteligência artificial. Trajetórias tecnológicas. Sustentabilidade. Mudança do clima. Desigualdades. Governança tecnológica. Desenvolvimento sustentável.

Keywords: *Artificial intelligence. Technological trajectories. Sustainability. Climate change. Inequalities. Technology governance. Sustainable development.*

1. Introdução

A palavra "*jugaad*", do hindi, pode soar muito distinto de tudo o que o ouvinte brasileiro já tenha escutado, mas sua definição é muito familiar. Equivale à "gambiarra" da variante brasileira do português: uma solução improvisada, feita com poucos recursos, para atender, de maneira pragmática, uma necessidade. Há, porém, uma grande diferença. Se a versão nacional costuma carregar um sentido pejorativo, que enfatiza a falta de aderência a rigores técnicos, a alternativa indiana é altamente positiva, pois destaca, além da frugalidade, a engenhosidade e a flexibilidade.

Independentemente da avaliação que se faça, uma característica da "*jugaad*" ou da "gambiarra" é particularmente relevante: a capacidade de reproduzir efeitos e funcionamentos de tecnologias mais sofisticadas, com uso significativamente menor de insumos, sejam financeiros, de materiais ou energéticos. Ao tomar um exemplo oriundo do próprio país asiático, recorda-se que, à época da bem-sucedida missão Mangalyaan, que levou uma sonda orbital ao planeta Marte, o governo indiano vangloriava-se com o fato de que o orçamento daquela empreitada espacial-tecnológica teria representado pouco mais de 10% dos custos de missões equivalentes de outros programas espaciais nacionais, em particular o norte-americano (NBC News, 2014).

O princípio do "máximo resultado com menor insumo" tem, obviamente, um apelo muito grande no contexto de graves desafios ambientais. Grande parte deles é decorrente, de uma forma ou de outra, do consumo até então indiscriminado de recursos e da geração correspondente de resíduos que a humanidade vem fazendo desde a primeira Revolução Industrial. Nesse sentido, o desenvolvimento de tecnologias consideradas "ambientalmente saudáveis" (do Inglês *environmentally sound technologies*) tem sido orientado pela lógica da otimização da relação entre, de um lado, saída, e, de outro, insumos e resíduos, condição que se traduz no emprego de princípios, como o da circularidade, do redirecionamento de resíduos para outros processos ou, simplesmente, de eficiência operacional por meio de mecanismos inovadores.

A lógica por trás da "*jugaad*" e da "gambiarra", portanto, não se limita à criatividade informal ou à engenhosidade popular. Traduz uma racionalidade técnica orientada por condicionantes externos – como a escassez de recursos e a urgência de responder a limites planetários – e que desafia modelos

tecnológicos orientados exclusivamente por uma dinâmica interna de acumulação e sofisticação. Como observam Lema e Perez (2024), a "transformação verde" caracteriza-se justamente por esse tipo de orientação exógena: impulsionada por pressões sociais e ecológicas, exige reconfigurações nas trajetórias tecnológicas para atender a objetivos coletivos, em contraste com o percurso até agora dominante das tecnologias de informação e comunicação (TIC), que têm evoluído predominantemente de maneira autocentrada, por meio de ciclos cumulativos de inovação.

Esse contraste entre trajetórias impulsionadas por imperativos sociais e aquelas guiadas por forças autônomas lança uma questão crucial para o momento atual: será possível reorientar o desenvolvimento da inteligência artificial (IA) [do Inglês *artificial intelligence]*, uma das tecnologias digitais mais dinâmicas da atualidade, de modo que ela atenda aos imperativos ambientais e, de modo mais amplo, do desenvolvimento sustentável? E, se for possível, quais seriam os meios técnicos, políticos e institucionais capazes de induzir essa mudança de rota, conciliando o potencial transformador da IA com as exigências de equilíbrio ecológico, justiça social e inclusão econômica?

2. "Faca de dois ou mais gumes?"

Desde o ressurgimento da aprendizagem de máquina (*machine learning*), impulsionado pelas descobertas de Geoffrey Hinton (Krizhevsky *et al.*, 2012) no campo das redes neurais profundas, a IA tem experimentado um crescimento exponencial sob diversos parâmetros. O número de usuários de aplicações baseadas em IA disparou, com bilhões de pessoas interagindo diariamente mediante assistentes virtuais, tradutores automáticos, sistemas de recomendação e ferramentas de geração de texto e imagem. Ao mesmo tempo, o leque de aplicações ampliou-se drasticamente, abrangendo setores, como varejo, finanças, saúde, agricultura, transporte e educação. Tal avanço foi sustentado por um aumento vertiginoso no poder de processamento computacional, com a popularização de unidades de processamento gráfico (GPU) [do Inglês, *graphics processing unit*), arquiteturas especializadas, como as unidades de processamento tensorial (TPU) [do Inglês, *tensor processing units*] e o desenvolvimento de infraestruturas de computação em nuvem de larga escala. Por meio desse conjunto de fatores, a IA tem se consolidado como uma das tecnologias mais transformadoras do século 21.

Esse crescimento tem-se dado às custas de um consumo proporcionalmente acelerado de recursos. À medida que as aplicações de IA crescem em quantidade e em poder de processamento, amplia-se o uso de eletricidade, água e metais. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA) [do Inglês, *International Energy Agency*] (IEA, 2025), o consumo de energia elétrica por *data centers* – grandes centros computacionais em que os modelos de IA são treinados e executados – duplicará até o fim da década, de 415 TWh em 2024 para 945 TWh em 2030, o que representa

um crescimento dos atuais 1,5% da demanda global por eletricidade para 3%. É muito difícil estimar qual a contribuição da IA para o consumo atual, tendo em vista que um *data center* abriga variados tipos de aplicação, incluindo os tradicionais *softwares*, como serviço *SaaS*, bancos de dados e os motores das páginas *web*. No entanto, pode-se afirmar, com significativo nível de certeza, que os modelos de IA serão os principais impulsionadores de crescimento nas próximas décadas.

Nesse sentido, as emissões de gás carbônico associadas à operação dessas infraestruturas também apresentam forte tendência de aumento em razão do emprego da IA, com previsão de passar de 180 milhões de toneladas métricas em 2024 para até 500 milhões, em 2035 (IEA, 2025). Semelhantemente, o consumo direto e indireto de água – para fins de resfriamento, de produção de semicondutores e de geração de eletricidade – deve superar 1200 bilhões de litros em 2030. Com o mesmo dinamismo, antecipa-se um aumento sem precedentes da demanda por materiais, como cobre, silício, lantanídeos (terras raras) e gálio, exercendo pressão sobre a produtividade da mineração em âmbito global.

Se, por um lado, a IA possui evidentes passivos ambientais, pode-se argumentar que, por outro, pode ser importante aliada no enfrentamento e na prevenção de inúmeros outros. Por ser uma tecnologia de propósito geral e capaz de identificar padrões funcionais a partir de dados históricos, desempenha funções de predição, correlação, otimização, análise de imagens, entre muitas outras. Tais funcionalidades possibilitam o desenvolvimento de aplicações robustas em diversas áreas. Em um estudo seminal conduzido por 22 pesquisadores (Rolnick *et al.*, 2022), foram identificadas 34 grandes áreas em que a aprendizagem de máquina pode apoiar os esforços de combate à mudança do clima, entre as quais a otimização da eficiência de veículos, o aprimoramento de materiais, a detecção de desmatamento, a previsão de eventos extremos, o modelamento de impactos e o planejamento urbano. Na proteção da diversidade biológica, sistemas de IA podem ser empregados para monitorar o movimento e contabilizar as espécies de animais em extinção, ajudar na catalogação de novas plantas e correlacioná-las a espécies conhecidas, entre outras aplicações. Também há inúmeros outros exemplos de usos de IA para acelerar a despoluição, por exemplo, de corpos d'água e do ar de grandes centros urbanos.

Essas duas facetas antagônicas da inteligência artificial – como vilã e heroína do meio ambiente – costumam render-lhe a alcunha de "faca de dois gumes". Quando, contudo, se expande o campo de visão e se considera a natureza multidimensional do desenvolvimento sustentável, chega-se logo à conclusão de que o conjunto de benefícios e de malefícios da IA é muito mais complexo.

No campo social, a IA também apresenta potenciais ambivalências. Por um lado, pode contribuir para ampliar o acesso a serviços públicos essenciais, como saúde, educação e segurança. Ferramentas baseadas em IA já têm sido utilizadas, por exemplo, para apoiar diagnósticos médicos em regiões remotas, personalizar trilhas de aprendizagem para estudantes em ambientes com alta taxa de

evasão escolar, ou mesmo identificar padrões de violência urbana a partir da análise de dados históricos. Por outro, os riscos sociais também são expressivos. Um dos principais refere-se à substituição de postos de trabalho por sistemas automatizados, especialmente em setores com atividades repetitivas ou padronizáveis, como atendimento ao cliente, transporte, logística e, até mesmo, serviços administrativos no setor público. Embora a automação possa gerar novas profissões e funções, a transição tende a ser desigual e excludente, atingindo mais fortemente trabalhadores com menor nível de qualificação formal. Além disso, os sistemas de IA podem reproduzir e até amplificar preconceitos sociais e raciais embutidos nos dados com que são treinados (Suresh; Guttag, 2021), o que já tem gerado episódios de discriminação algorítmica em áreas, como crédito, recrutamento, policiamento preditivo e justiça criminal.

No campo econômico, não resta dúvida de que a IA pode gerar ganhos expressivos de produtividade, reduzir custos operacionais e estimular a inovação em setores estratégicos. A automatização de tarefas repetitivas, a otimização de processos industriais, a personalização de serviços e a capacidade de gerar novos produtos e modelos de negócio constituem algumas das formas pelas quais a IA tem impulsionado a competitividade econômica. No entanto, tais benefícios tendem a se concentrar em países e empresas que detêm os ativos essenciais para o seu desenvolvimento – como infraestrutura computacional, dados em larga escala, capital humano altamente qualificado e capacidade de investimento em pesquisa e desenvolvimento. Essa condição aprofunda desigualdades entre países centrais e periféricos, ao mesmo tempo em que reconfigura cadeias de valor globais em favor de quem já ocupa posição dominante no ecossistema digital.

3. Por uma IA sustentável

Pensar na possibilidade de sistemas de inteligência artificial sustentáveis significa pensar em uma trajetória tecnológica que amplifique as vantagens e diminua ou erradique por completo as desvantagens, nas três grandes dimensões do desenvolvimento sustentável – a ambiental, a econômica e a social. Consideradas as múltiplas naturezas dos impactos dessa tecnologia, os potenciais mecanismos de incidência que podem reorientar sua trajetória também variam significativamente. Se tomarmos o receituário tradicional de medidas (Veiga, 2025), colocar a inteligência artificial no trilho da sustentabilidade poderia envolver o emprego de diferentes incentivos, de regulações em variadas áreas e de distintos mecanismos de mercado. Ainda que tal cesta de intervenções possa contribuir decisivamente para o objetivo de induzir o surgimento de aplicações de IA ambientalmente amigáveis, socialmente justas e economicamente prósperas, há uma questão estrutural, que diz respeito à geopolítica – entendida como a distribuição geográfica de polos de poder –, que precisa ser endereçada para que o caminho da sustentabilidade possa ser trilhado de maneira decisiva.

4. A sustentabilidade ambiental da IA

Entre os três pilares do desenvolvimento sustentável, o ambiental talvez seja o mais tangível. Por lidar, em instância mais imediata, com efeitos de ordem física, são mais propensos a serem identificados, observados, mensurados, modelados e projetados. Não que sejam isentos de complexidade – muito pelo contrário –, mas, em uma abordagem comparativa em relação aos demais pilares, manifestam-se de modo mais palpável e são, por conseguinte, mais passíveis de controle. Ainda que os impactos ambientais da IA tenham merecido apenas recentemente mais atenção da pesquisa e da política, o crescimento vertiginoso da produção de inteligência a respeito da tecnologia, nos últimos dois anos, talvez seja um dos reflexos da maior facilidade de apreender os efeitos associados.

As considerações mais recentes sobre a questão ambiental da inteligência artificial parecem indicar uma expectativa de regulação do setor. A União Internacional de Telecomunicações (UIT) foi uma das instituições que, em 2024, deu o "pontapé" a esse processo, ao sugerir um arcabouço conceitual para o estabelecimento de padrões ambientais para a IA (ITU, 2024). Aspecto importante da abordagem adotada pela organização – cujo mandato é desenvolver normas internacionais para a interoperabilidade, a segurança e a eficiência de redes e serviços de telecomunicações e tecnologias digitais – é a análise do ciclo de vida de sistemas de IA, que passa por identificação do problema a ser resolvido, coleta de dados, desenho do modelo, seu treinamento, testes, avaliação de resultados, aprimoramento e, finalmente, início da operação – o que alguns autores chamam de "inferência". Outra significativa contribuição do trabalho da UIT é a identificação de "fatores de eficiência ambiental", que correspondem a possíveis áreas de intervenção para reduzir os passivos dos modelos. A organização considera o consumo energético associado ao tipo de processamento (treinamento *versus* inferência); a eficiência do *hardware*, tanto os semicondutores quanto a infraestrutura de esfriamento do ambiente; a otimização de algoritmos; a origem da eletricidade utilizada; a gestão otimizada dos dados; e a gestão de ciclo de vida como pontos-chave para reduzir a pegada da IA.

Com base nesses dois quadros conceituais, a UIT deu, em 2025 (ITU, 2025), um passo além, ao compilar e analisar as diferentes metodologias existentes para a mensuração das pegadas ambientais da IA. Identificou uma série de problemas e lacunas, entre os quais se destacam o uso excessivo de estimativas e indicadores indiretos (*proxies*), inconsistências na delimitação das etapas de ciclo de vida dos modelos de IA, subnotificação de emissões de escopo 3 (referente à cadeia de fornecedores) e um foco em emissões de carbono, em detrimento dos demais passivos.

Uma das práticas do mercado que sintetiza parte desses desafios é o uso da eficiência do uso de energia elétrica (PUE) (do Inglês, *power usage effectiveness*). Embora amplamente adotado como métrica de referência, o PUE mede apenas a proporção entre a energia total consumida por um

data center e aquela efetivamente destinada aos equipamentos de tecnologia da informação (TI) (servidores e equipamentos de rede), ignorando a origem da energia, o nível absoluto de utilização energética dos servidores e os impactos indiretos, como o uso de água e a pegada dos equipamentos acessórios de refrigeração. Com isso, mesmo infraestruturas com baixos valores de PUE podem apresentar elevada intensidade ambiental, mascarando externalidades e comprometendo a comparabilidade entre diferentes operações. O problema agrava-se diante da constatação de que esse índice é geralmente usado para o cálculo das emissões de carbono associadas, mediante combinação com fator de emissão da rede elétrica, uma variável, muitas vezes, pouco granular. Não por acaso, uma das recomendações mais recorrentes do relatório da organização é o aprimoramento de métodos e tecnologias para a mensuração direta (telemetria) de variáveis.

Outro problema apontado pela UIT que merece ser destacado é a falta de transparência com relação ao consumo hídrico, muitas vezes negligenciado. Li *et al.* (2025) aprofundam-se no debate e demonstram que a pegada hídrica de grandes modelos de IA pode ultrapassar cinco milhões de litros de água apenas na fase de treinamento, somando-se ainda o uso contínuo durante a inferência. Os autores chamam atenção para a distinção crítica entre água retirada – isto é, a quantidade total de água extraída de fontes naturais para resfriamento ou geração de energia – e água consumida, que representa a porção efetivamente perdida para evaporação ou retirada permanente do ciclo. Essa diferenciação é essencial para avaliar o real impacto sobre os ecossistemas, sobretudo em regiões com estresse hídrico. Apesar disso, tais métricas raramente são reportadas pelas empresas de tecnologia. O estudo também evidencia que a intensidade hídrica das operações varia significativamente conforme a localização, o clima e o tipo de infraestrutura, o que reforça a necessidade de maior transparência e estratégias, como o agendamento dinâmico de cargas de trabalho para mitigar os impactos em períodos ou regiões mais vulneráveis.

Apesar dos desafios com vistas à contabilização dos impactos ambientais da IA, a informação disponível tem ensejado os primeiros passos com relação à comparação de diferentes modelos. Um exemplo é o *AI Energy Score*, lançado em fevereiro de 2025 (Hugging Face *et al.*, 2025) por um consórcio de entidades liderado pela empresa Hugging Face, que busca estabelecer um sistema padronizado e transparente para avaliar a eficiência energética de modelos de IA. O índice baseia-se no consumo relativo de energia de GPU durante a inferência para tarefas específicas, permitindo comparações entre modelos de arquitetura e porte distintos. Ainda que limitado ao escopo energético e dependente da autorreporte dos desenvolvedores, o *AI Energy Score* representa avanço importante rumo à criação de instrumentos comparativos acessíveis e reprodutíveis.

Se, por um lado, a contabilização dos passivos ambientais tem sido guiada por uma necessidade de convergência e de harmonização, a mensuração dos benefícios encontra-se majoritariamente relegada à iniciativa individual e voluntária dos fornecedores de modelos. Anualmente, grandes

empresas globais que operam *data centers* – entre as quais, as chamadas *big techs* – costumam publicar relatórios de sustentabilidade, em que informam, entre outros dados, estimativas agregadas de mitigação de emissões de carbono alcançadas pelo emprego de suas ferramentas. Salta aos olhos a falta de harmonização metodológica entre os cálculos de cada projeto, bem como o uso generalizado de ferramentas subjetivas, como entrevistas de percepção com clientes. Sem um método objetivo e minimamente padronizado de cálculo, conduzidos por atores independentes, tais números correm o risco de serem percebidos pela sociedade mais ampla como peças de *marketing* sem função prática. Em um contexto de forte e inevitável crescimento da IA, comparar seus bônus e ônus ambientais por meio de processos críveis torna-se fundamental para que possamos avaliar se a orientação atribuída ao desenvolvimento da tecnologia é ambientalmente correta.

5. A sustentabilidade social da IA

O debate sobre os impactos sociais da inteligência artificial antecede a aceleração experimentada por essa tecnologia na última década, dado que tem sido mais tradicionalmente pautado pela ameaça percebida que a robótica – um dos ramos mais antigos da IA – exerce sobre o trabalho. Com o surgimento e a proliferação de produtos e serviços de IA, em particular funções com interação direta com consumidores, as considerações sobre o impacto no mercado laboral tornaram-se mais concretas, bem como emergiram novos desafios, em que se destaca, entre outros, o enviesamento de raça e de gênero.

No campo do trabalho, os sistemas de IA apresentam desafios complexos, com destaque para a automação de atividades repetitivas e padronizadas, que ameaça postos de trabalho especialmente nas ocupações de baixa qualificação. Setores como logística, atendimento ao cliente, serviços administrativos e transporte estão entre os mais impactados, com previsões de substituição parcial ou total de funções humanas por agentes automatizados. De acordo com o Fórum Econômico Mundial (WEF, 2023), estima-se que, até 2027, cerca de 83 milhões de empregos sejam eliminados em razão da automação, ao passo que 69 milhões de novos postos serão criados, resultando em uma perda líquida de 14 milhões de empregos no mundo. Já o Fundo Monetário Internacional (FMI) (FMI, 2024) projeta que aproximadamente 60% dos empregos nas economias avançadas são suscetíveis à automação por IA, sendo que, em metade desses casos, a tecnologia poderá reduzir a demanda por trabalho humano, impactando salários e contratações.

Embora se reconheça o potencial da IA para criar novas profissões, a transição tende a ser desigual, pois os empregos gerados exigem, em geral, maior qualificação e competências digitais, ampliando o risco de aprofundamento da exclusão socioeconômica. Além disso, as assimetrias no acesso à infraestrutura digital e à capacitação técnica dificultam que países em desenvolvimento

ou populações vulneráveis se beneficiem da transformação tecnológica em curso. Os ganhos de produtividade resultantes da IA têm se concentrado em poucas economias avançadas e em grandes empresas que já detêm os principais ativos tecnológicos, como dados, *hardware* e capital humano especializado (Gmyrek *et al*., 2023). Nesse contexto, a IA pode agravar a precarização das relações de trabalho e a informalização de atividades, sobretudo em plataformas digitais, em que algoritmos controlam, de forma opaca, o ritmo e a remuneração do trabalho (Eubanks, 2018).

Outro desafio crítico para a sustentabilidade social da IA diz respeito à reprodução e amplificação de desigualdades raciais e de gênero por meio de vieses algorítmicos. Diversas pesquisas têm demonstrado que sistemas de IA, quando treinados com dados históricos enviesados ou operando a partir de critérios opacos, podem produzir decisões discriminatórias em áreas, como recrutamento, crédito, vigilância, justiça criminal e publicidade digital. Um estudo recente da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (Unesco) [do Inglês, *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*] (Unesco, 2024) revelou que modelos de linguagem de uso generalizado associam os nomes femininos a termos relacionados ao lar e à família, enquanto nomes masculinos são vinculados, com maior frequência, a palavras, como negócios, carreira e salário. Esses sistemas também apresentaram padrões de associação discriminatória contra pessoas negras, indígenas e LGBTQIA+[2], reforçando estereótipos e exclusões históricas. Em aplicações práticas, algoritmos utilizados para triagem de currículos descartaram automaticamente candidaturas com base na raça ou no gênero, como mostrou uma investigação empírica de An *et al.* (2024), que analisaram grandes modelos de linguagem utilizados em plataformas de recrutamento. Há também evidências de que *softwares* de reconhecimento facial exibem taxas de erro significativamente mais altas para mulheres e pessoas negras (Buolamwin; Gebru, 2018). Esses resultados revelam como a IA pode atuar como vetor de reprodução de desigualdades, agora em escala automatizada e com aparência de neutralidade técnica.

Além dos impactos sobre o trabalho e da reprodução de vieses discriminatórios, a expansão da IA traz consigo outros riscos sociais relevantes, entre os quais se destacam o uso da tecnologia para vigilância em massa, a erosão da privacidade, a disseminação automatizada de desinformação e os efeitos negativos sobre a saúde mental, especialmente entre jovens. Tais riscos tendem a afetar desproporcionalmente grupos já vulnerabilizados, ampliando desigualdades sociais existentes.

Diferentemente da questão ambiental, que passa pela consideração da mensuração objetiva de impactos e por sua comparação, o enfrentamento dos riscos sociais e a ampliação dos benefícios precisariam estar mais fortemente calcados em uma combinação de políticas e leis que, dependendo de cada tipo de impacto, envolva incentivos ou punições.

2 A sigla que representa lésbicas, *gays*, bissexuais, transgêneros, *queer*, intersexuais, assexuais e outras identidades de gênero e orientações sexuais que fogem das normas tradicionais.

Ainda que os desafios sociais sejam numerosos, a IA também possibilita oportunidades relevantes para a promoção da inclusão e justiça social, desde que seu desenvolvimento e aplicação sejam orientados por valores públicos e políticas redistributivas. Em contextos com forte escassez de profissionais qualificados, ferramentas de IA podem atuar como suporte para ampliar o alcance e a qualidade de serviços públicos essenciais, como educação, saúde e assistência social. Aplicações baseadas em aprendizagem de máquina já vêm sendo testadas com sucesso nos projetos de alfabetização em áreas remotas, na triagem de pacientes em sistemas de saúde sobrecarregados e na identificação proativa de situações de vulnerabilidade, como abandono escolar e insegurança alimentar (Unesco, 2023). Essas soluções, porém, exigem governança institucional, supervisão humana e adaptações locais para que seus benefícios não sejam capturados exclusivamente por agentes privados ou convertidos em novos mecanismos de exclusão. Quando pensada a partir do Sul Global, a IA pode ser uma aliada importante na construção de capacidades estatais, na melhoria da prestação de serviços e no empoderamento de comunidades marginalizadas, desde que associada a estratégias nacionais de inclusão digital, soberania tecnológica e participação social.

Nesse sentido, a construção de uma trajetória socialmente sustentável para a IA poderia envolver a combinação de três pilares complementares. O primeiro seria o reconhecimento legal dos direitos das populações afetadas por decisões automatizadas, o que inclui o direito à explicação, à contestação e à não discriminação por sistemas algorítmicos. O segundo envolveria o fortalecimento de capacidades públicas de regulação, auditoria e fiscalização das aplicações de IA, com vistas a garantir padrões mínimos de justiça e responsabilidade. E o terceiro estaria relacionado ao fomento de ecossistemas locais de inovação comprometidos com os princípios da equidade, da transparência e do controle social. A construção de tecnologias socialmente justas depende menos de soluções técnicas isoladas e mais da criação de condições institucionais para o escrutínio coletivo e a deliberação pública. Isso implica, no caso do Sul Global, não apenas importar boas práticas regulatórias, mas desenvolver instrumentos e estruturas próprias, baseadas em experiências locais e voltadas a objetivos de desenvolvimento sustentável que reflitam as demandas de suas populações.

6. A sustentabilidade econômica da IA

O pilar econômico do desenvolvimento sustentável diz respeito à geração de prosperidade e valor, de modo a ampliar a renda *per capita* de um país e, em paralelo, garantir uma distribuição mais equilibrada da riqueza. A inteligência artificial, como tecnologia de propósito geral, tem elevado potencial para impulsionar a produtividade, transformar cadeias de valor e dinamizar setores inteiros da economia. Projeções da Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento (UNCTAD) [do Inglês, *United Nations Conference on Trade and Development*] (UNCTAD, 2025)

estimam que o mercado global de IA poderá atingir 4,8 trilhões de dólares até 2033, refletindo não apenas a expansão de produtos e serviços com base em IA, mas também sua incorporação transversal em setores, como saúde, energia, finanças, educação e agricultura.

Apesar de seu potencial transformador, os benefícios econômicos da IA têm sido apropriados de forma profundamente desigual, refletindo e agravando disparidades estruturais existentes entre países e regiões. As origens dessa desigualdade estão na concentração de capacidades estratégicas – como infraestrutura digital, capital financeiro, acesso a grandes volumes de dados e mão de obra altamente qualificada – em um número restrito de países, majoritariamente no Norte Global. Ainda segundo a UNCTAD (2025), cerca de 70% dos investimentos privados em IA estão concentrados em um único país, os Estados Unidos, enquanto a maioria das economias em desenvolvimento, à exceção da China, segue ausente das cadeias globais de valor relacionadas à tecnologia. Essa assimetria manifesta-se não apenas na distribuição de lucros e patentes, mas também na capacidade de definir padrões técnicos e regulatórios, consolidando um ciclo de dependência tecnológica do Sul Global. Além disso, países em desenvolvimento frequentemente ocupam posições subordinadas na cadeia de produção da IA – como fornecedores de matérias-primas críticas (como lítio e cobalto) ou de serviços digitais de baixo valor agregado – sem acesso proporcional aos retornos econômicos gerados.

A desigualdade no acesso e na apropriação dos benefícios da IA manifesta-se de forma especialmente aguda na esfera da inovação. EUA e China concentram mais de 60% das patentes globais relacionadas à IA, revelando profunda disparidade na geração de conhecimento e na capacidade de transformar avanços científicos em aplicações econômicas. Essa assimetria é reforçada pela concentração de centros de pesquisa de ponta, infraestrutura computacional de alto desempenho e capital de risco no Norte Global, o que permite a essas economias capturar a maior parte dos lucros, dos empregos qualificados e da influência normativa no ecossistema da IA.

No entanto, o mesmo relatório destaca que, ao lado dessas desigualdades, há janelas de oportunidade para os países do Sul Global construírem trajetórias de inovação mais inclusivas. Modelos adaptados ao contexto local – como os de baixo consumo energético, soluções abertas e acessíveis, e aplicações voltadas para desafios sociais e ambientais específicos – podem criar nichos tecnológicos estratégicos. A experiência de países, como Brasil, Índia e Quênia, demonstra que é possível alavancar capacidades endógenas de inovação a partir de políticas públicas articuladas com universidades, setor produtivo e comunidades locais, ampliando a relevância e a apropriação social dos avanços em IA (UNCTAD, 2025). Nesse sentido, a Unesco (2023) ressalta novamente que ecossistemas de inovação orientados por valores públicos, infraestrutura aberta e objetivos de desenvolvimento sustentável são essenciais para que o Sul Global não apenas adote, mas transforme criticamente o uso da IA em favor de suas próprias prioridades.

Outro fator que explica a desigualdade na apropriação econômica da IA é o acesso assimétrico aos dados – insumo central para o desenvolvimento e o treinamento de sistemas inteligentes. Países e empresas que detêm maior capacidade de coleta, armazenamento e processamento de grandes volumes de dados consolidam posições dominantes nas cadeias de valor da economia digital. Essa concentração de dados em plataformas e servidores localizados majoritariamente no Norte Global confere vantagens competitivas substanciais às grandes corporações de tecnologia, permitindo-lhes alimentar modelos fundacionais, atrair investimentos e impor padrões técnicos (UNCTAD, 2025). Sadowski (2020) argumenta que essa dinâmica dá origem a uma forma de "colonialismo de dados", na qual populações do Sul Global tornam-se fontes de informação para sistemas desenvolvidos e monetizados por agentes externos, sem que haja redistribuição dos ganhos nem soberania sobre os usos futuros dessas informações.

No entanto, a questão dos dados também representa uma oportunidade estratégica. Com políticas adequadas de governança e proteção de dados, países em desenvolvimento podem estimular iniciativas de dados abertos, cooperativas de dados e repositórios públicos voltados a fins de interesse social, como agricultura familiar, saúde pública, biodiversidade e gestão climática. A criação de marcos regulatórios que garantam o controle local sobre dados sensíveis e incentivem seu uso responsável para fins de desenvolvimento pode transformar esse recurso em ativo econômico e político de alto valor, fortalecendo a autonomia digital do Sul Global.

Para que os países em desenvolvimento possam reverter as assimetrias existentes e transformar dados em valor agregado local, é necessário articular políticas públicas voltadas ao fortalecimento de suas capacidades digitais e produtivas. A UNCTAD (2025) aponta três frentes prioritárias: i) o desenvolvimento de infraestrutura digital de base, como conectividade de alta qualidade, *data centers* nacionais e acesso à computação em nuvem; ii) a formulação de marcos regulatórios que promovam a inovação ao mesmo tempo em que protegem direitos fundamentais; e iii) o investimento contínuo em educação técnica e científica. Essas medidas devem ser integradas a estratégias de fomento à pesquisa aplicada e ao empreendedorismo local, com foco na produção de soluções de IA voltadas a desafios sociais e ambientais específicos. Nesse sentido, a construção de uma economia digital sustentável no Sul Global passa não apenas pela adoção de tecnologias externas, mas pela constituição de um projeto político de inovação orientado por valores públicos, soberania tecnológica e justiça distributiva.

7. O modelo *jugaad*-gambiarra

Ao considerar os elementos orientadores de uma IA sustentável abordados, qual seria um possível modelo? Inspirados nas soluções inovadoras, fortemente influenciadas pela necessidade local e

subordinadas à lógica da escassez de recursos que a *jugaad* e a gambiarra nos trazem, podemos pensar em um novo padrão, sustentável, de inteligência artificial?

Em contraste com o modelo hegemônico de desenvolvimento tecnológico – baseado em altos investimentos, consumo intensivo de energia e centralização de capacidades –, um paradigma inspirado na *jugaad* e na gambiarra convida à valorização de soluções de baixo custo, adaptadas a contextos específicos e capazes de operar com limitações estruturais. Em vez de perseguir incessantemente modelos cada vez maiores e mais complexos, essa lógica propõe que se invista em modelos mais leves, eficientes e direcionados a finalidades concretas, com impacto social e ambiental mensurável. Desenvolvimentos recentes na China, de que são exemplos o DeepSeek e Kimi K2 (Gibney, 2025), atestam a potencialidade desse paradigma. Isso pode se traduzir, ainda, no uso de modelos compactos treinados em dados locais, que funcionem *offline* e que sejam interoperáveis com infraestruturas de baixa capacidade – como já ocorre em várias aplicações para agricultura familiar ou educação em zonas rurais. A eficácia, nesse caso, não é medida pela escala ou pelo grau de sofisticação computacional, mas pela capacidade de resolver problemas reais com parcimônia de recursos.

Além da eficiência, o modelo *jugaad*-gambiarra valoriza a endogeneidade, ou seja, o enraizamento das soluções tecnológicas em ecossistemas locais de inovação. Ao promover a experimentação tecnológica, o modelo favorece o desenvolvimento de capacidades nacionais e comunitárias, fortalecendo a autonomia frente a modelos exógenos e pouco responsivos às realidades locais. Mais do que uma resposta emergencial à limitação de recursos, a abordagem pautada pela *jugaad*-gambiarra pode oferecer um paradigma de inovação sustentável, ancorada na criatividade, na adaptabilidade e no compromisso com o bem comum. A construção de um futuro digital justo e ambientalmente responsável pode depender, em grande medida, da capacidade de o Sul Global transformar suas restrições em alavancas de transformação.

8. Conclusão: uma *check-list* provisória da IA genuinamente sustentável

Com base em debates e evidências apresentados ao longo do artigo, é possível delinear alguns critérios preliminares para orientar a transição rumo a uma inteligência artificial genuinamente sustentável.

O primeiro deles é a transparência, especialmente no que diz respeito à pegada ambiental e às decisões automatizadas. Métricas padronizadas, verificáveis e públicas devem ser adotadas para

mensurar os impactos energéticos, hídricos e materiais dos modelos de IA, bem como os vieses e as desigualdades que possam reproduzir.

O segundo critério é a inclusividade, que exige considerar a diversidade social, cultural e territorial dos contextos em que a IA é aplicada, promovendo acessibilidade e participação nos processos de desenvolvimento, implantação e avaliação dos sistemas.

O terceiro elemento fundamental é a endogeneidade, ou seja, o fortalecimento de capacidades locais de inovação e governança, especialmente no Sul Global. Isso requer políticas de incentivo à pesquisa aplicada, marcos regulatórios justos, infraestrutura digital pública e estratégias de soberania tecnológica.

Por fim, a sustentabilidade da IA demanda finalidade pública. Os sistemas devem estar orientados pelo interesse coletivo, como a justiça social, a equidade econômica e a regeneração ecológica.

Em conjunto, esses quatro pilares – transparência, inclusividade, endogeneidade e finalidade pública – compõem uma proposta de *check-list* que, longe de ser exaustiva, serve como base para que Estados, empresas, instituições e comunidades possam avaliar e reorientar suas trajetórias tecnológicas com responsabilidade e ambição transformadora.

Referências

AN, Haozhe; ACQUAYE, Christabel; WANG, Colin Kai; LI, Zongxia; RUDINGER, Rachel. Do large language models discriminate in hiring decisions on the basis of race, ethnicity, and gender? *In:* ANNUAL MEETING OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTATIONAL LINGUISTICS, 62nd., ACL. **Proceedings...** short papers. ACL, 2024. p. 386–397. Disponível em: *https://www.researchgate.net/publication/381485284_Do_Large_Language_Models_Discriminate_in_Hiring_Decisions_on_the_Basis_of_Race_Ethnicity_and_Gender/fulltext/6670fdf2b769e769193e8d75/Do-Large-Language-Models-Discriminate-in-Hiring-Decisions-on-the-Basis-of-Race-Ethnicity-and-Gender.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2FoaW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2FoaW9uIn19*

BUOLAMWINI, Joy; GEBRU, Timnit. Gender shades: intersectional accuracy disparities in commercial gender classification. *In:* FAT '18 Conference on Fairness, Accountability, and Transparency. New York, 2018. **Proceedings ...** ACM, 2018. p. 77–91. Disponível em: *https://scispace.com/pdf/gender-shades-intersectional-accuracy-disparities-in-4qgeuoc1i3.pdf*

EUBANKS, Virginia. **Automating inequality:** how high-tech tools profile, police, and punish the poor. New York: St. Martin's Press, 2018. Disponível em: https://lthj.qut.edu.au/article/download/1386/845

FUNDO MONETÁRIO INTERNACIONAL – FMI. **Gen-AI:** artificial intelligence and the future of work. Washington, D.C.: International Monetary Fund, 2024. Disponível em: *https://www.imf.org/en/Publications/Staff-Discussion-Notes/Issues/2024/01/14/Gen-AI-Artificial-Intelligence-and-the-Future-of-Work-542379*

GIBNEY, Elizabeth. Another deepseek moment: Chinese AI model Kimi K2 stirs excitement. **Nature,** v. 643, p. 889–890, 16 jul. 2025. DOI: 10.1038/d41586-025-02275-6. Acesso em: 27 jul. 2025.

GMYREK, Piotr; BERG, Janine; BESCOND, David. **Generative AI and jobs:** a global analysis of potential effects on job quantity and quality. Genebra: International Labour Organization, 2023. (ILO Working Paper, n. 96). Disponível em: *https://researchrepository.ilo.org/esploro/outputs/encyclopediaEntry/995326516102676*

HUGGING FACE; SALESFORCE; COHERE; CARNEGIE MELLON UNIVERSITY. **AI energy score:** Initiative to establish comparable energy efficiency ratings for AI models. 2025. Disponível em: *https://huggingface.github.io/AIEnergyScore/*. Acesso em: 27 jul. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Energy and AI:** World energy outlook special report. Paris: IEA, 2025. Disponível em: *https://www.iea.org/reports/energy-and-ai*

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION – ITU. **AI and the environment: international standards for AI and the environment:** 2024 report. Geneva: ITU, 2024. Disponível em: *https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/env/T-ENV-ENV-2024-1-PDF-E.pdf*

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION – ITU. **Measuring what matters: how to assess AI's environmental impact**. Geneva: ITU, 2025. Disponível em: *https://www.sipotra.it/wp-content/uploads/2025/08/Measuring-what-matters-How-to-assess-AIs-environmental-impact.pdf*

KRIZHEVSKY, Alex; SUTSKEVER, Ilya; HINTON, Geoffrey E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *In:* PEREIRA, Fernando; BURGES, C.J.C.; BOTTOU, Léon; WEINBERGER, K.Q. (Org.). **Advances in neural information processing systems,** v. 25. Curran Associates, Inc., 2012. p. 1097–1105. Disponível em: *https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2012/file/c399862d3b9d6b76c8436e924a68c45b-Paper.pdf*

LEMA, R.; PEREZ, C. The green transformation as a new direction for techno-economic development. **UNU-MERIT Working Papers,** n. 1, 2024. Disponível em: *https://cris.maastrichtuniversity.nl/ws/portalfiles/portal/182941762/wp2024-001.pdf*

LI, Pengfei; YANG, Jianyi; ISLAM, Mohammad A.; REN, Shaolei. Making AI less 'thirsty': uncovering and addressing the secret water footprint of AI models. **Communications of the ACM**, v. 68, n. 7, p. 54–61, jul. 2025. Disponível em: *https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3724499*

NBC NEWS. **Why India's mars orbiter mission cost less than 'gravity' movie.** 2014. Disponível em: https://www.nbcnews.com/science/space/why-indias-mars-orbiter-mission-cost-less-gravity-movie-n210681

ROLNICK, David; DONTI, Priya L.; KAACK, Lynn H. *et al*. Tackling climate change with machine learning. **ACM Computing Surveys,** v. 55, n. 2, art. 42, p. 1-96, Feb. 2022. Disponível em: *https://asross.github.io/publications/RolnickEtAl2022.pdf*

SADOWSKI, Jathan. **Too smart:** how digital capitalism is extracting data, controlling our lives, and taking over the world. Cambridge, MA: MIT Press, 2020. Disponível em: *https://compress-pdf-free.obar.info/?fileurl=https%3A%2F%2Fdokumen.pub%2Fcdownload%2Ftoo-smart-how-digital-capitalism-is-extracting-data-controlling-our-lives-and-taking-over-the-world-026253858x-9780262538589 html&title=Too+Smart%3A+How+Digital+Capitalism+is+Extracting+Data%2C+Controlling+Our+Lives%2C+and+Taking+Over+the+World%0D%0A+026253858X%2C+9780262538589&utm_source=dokumenpubCompressPdfQueue&utm_medium=queue&utm_campaign=too-smart-how-digital-capitalism-is-extracting-data-controlling-our-lives-and-taking-over-the-world-026253858x-9780262538589&h=4PcDWAS6%2F%2F3w2AoiNpM5VQ%3D%3D*

SURESH, Harini; GUTTAG, John V. A Framework for understanding unintended consequences of machine learning. **Communications of the ACM, v**. 64, n. 6, p. 62–71, 2021. Disponível em: *https://arxiv.org/pdf/1901.10002*

UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT – UNCTAD. **Technology and innovation report 2025**: Innovation for development in the age of AI. Geneva: UNCTAD, 2025. Disponível em: *https://unctad.org/system/files/official-document/tir2025_en.pdf*

UNITED NATIONS EDUCATIONAL SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION – UNESCO; International Research Centre On Artificial Intelligence Under The Auspices Of Unesco – IRCAI. **Challenging systematic prejudices:** an investigation into gender bias in large language models. Paris: UNESCO, 2024. Disponível em: *https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388971*

UNITED NATIONS EDUCATIONAL SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION – UNESCO. **Technology in education:** a tool on whose terms? Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2023. Disponível em: *https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000385723*

VEIGA, José Eli da Savoia. **O Antropoceno e o pensamento econômico**. São Paulo: Editora 34, 2025.

WORLD ECONOMIC FORUM - WEF. **Future of Jobs Report 2023**. Geneva: 2023. 296 p. Disponível em: *https://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs_2023.pdf*

Ciência, tecnologia e inovação (CT&I) para a Amazônia: subsídios para cadeias sustentáveis de pesquisa e produção

Maria Carlota de Souza-Paula[1], *Adriana Badaró de Carvalho*[2]

Resumo

Este artigo resume um conjunto de temas e atividades em ciência, tecnologia & inovação (CT&I) considerados indispensáveis ao desenvolvimento de cadeias sustentáveis de produção na Amazônia Legal (AL), identificados em ampla revisão de literatura sobre algumas dessas cadeias, no âmbito do projeto "CT&I para a Amazônia", coordenado pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), visando a gerar subsídios para uma agenda estratégica em CT&I para a região. Essa revisão permitiu integrar a esses subsídios conhecimentos e sugestões derivados de grande parte das

Abstract

This article summarizes key science, technology and innovation (ST&I) topics and activities considered imperatives for the development of sustainable research and production chains in the Brazilian Amazon. These elements have been identified through an extensive literature review on selected bio-based chains conducted in the scope of the "ST&I for the Amazon" project, coordinated by CGEE, which aims to support the formulation of a strategic agenda for the region. This review allowed the integration of priorities and recommendations from prior researches, practical experiences,

1 Doutora em Ciência Política pela Universidade de São Paulo (USP), especialista em Política e Gestão de Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I). Analista em CT&I pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (aposentada), foi coordenadora de programas internacionais de CT&I e professora do mestrado em CT&I e Desenvolvimento Sustentável no Centro de Desenvolvimento Sustentável (CDS) da Universidade de Brasília (UnB). Atualmente, é consultora do projeto sobre CT&I para a Amazônia no Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) (2023-2025).

2 Mestre em CT&I e Desenvolvimento Sustentável pela UnB; assessora técnica do CGEE desde 2008, onde coordena o Observatório de Ciência, Tecnologia e Inovação (OCTI) e o Projeto CT&I para a Amazônia.

pesquisas, análises, relatórios de iniciativas e atividades realizadas por diversos atores sobre as cadeias na região.

Palavras-chave: Amazônia. Cadeias sustentáveis de pesquisa e produção. CT&I.

evaluations, proposals and other initiatives carried out by a wide range of stakeholders involved in these chains.

Keywords: Amazon. Research and production sustainable chains. ST&I.

1. Introdução

Este artigo tem origem em uma extensa revisão bibliográfica sobre cadeias sustentáveis de pesquisa de produção na Amazônia Legal (AL), buscando identificar contribuições necessárias do campo de ciência, tecnologia e inovação (CT&I) para a organização e consolidação das mesmas. É uma das linhas de trabalho do projeto "CT&I para a Amazônia", coordenado pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) – com o objetivo de gerar subsídios para uma agenda estratégia de CT&I integrada aos esforços de aproveitamento produtivo e inovador dos recursos biológicos da região.[3]

Essa revisão possibilitou agregar análises e sugestões de um grande número de atores – pesquisadores, empresas, organizações não governamentais (ONG), organizações do setor privado, instituições de política e fomento em CT&I e outros organismos – que têm elaborado, apoiado e implementado políticas, programas e projetos sobre as cadeias, sem pretensão de esgotar os temas e seus desdobramentos, nem as necessidades e sugestões para o campo de CT&I, trabalho que necessita de outras formas de busca, ampliação e constante observação. No caso do projeto coordenado pelo CGEE, esses resultados complementam os resultados de outras atividades do projeto, como as oficinas com atores regionais.

É importante lembrar que, na visão orientadora do projeto, as cadeias devem estar associadas à promoção do desenvolvimento sustentável da Amazônia, integrando cuidados ambientais – conservação da biodiversidade, restauração e preservação da floresta e restabelecimento de seus serviços ecossistêmicos – e sociais, além da perspectiva econômica, abrangência esta observada na revisão.

3 Desenvolveu-se a abordagem de cadeias sustentáveis de pesquisa e produção, associada à visão de que uma agenda de CT&I necessita ser construída como parte da organização e consolidação das cadeias de produção, de forma a contribuir para que elas sejam efetivos vetores de desenvolvimento sustentável. Os primeiros alvos da revisão bibliográfica foram as cadeias do açaí, castanha, babaçu, cupuaçu e temas estratégicos, como: energia fotovoltaica e restauração florestal, definidos a partir de oficinas com atores locais nos diversos estados da AL. Os tópicos apresentados neste artigo não esgotam as necessidades e as demandas em CT&I, mas representam uma síntese dos principais destaques encontrados na literatura, no caso das cadeias com base em recursos biológicos. Essa revisão incluiu artigos científicos, livros, relatórios de programas, projetos e outras iniciativas voltadas para essas cadeias e materiais divulgados por um grande número de atores.

Na primeira parte do artigo, destacam-se três temas que não se restringem às cadeias baseadas em recursos biológicos, mas que são também essenciais para outras iniciativas e para o tratamento mais amplo sobre desenvolvimento sustentável na Amazônia. Em seguida, são apresentados temas diretamente associados à promoção e consolidação dessas cadeias, que sintetizam aspectos e fatores interdependentes, os quais, embora discutidos separadamente, têm de ser articulados de forma integrada no processo de estruturação de cadeias sustentáveis na região.[4]

2. Conhecimentos, territórios e informação

2.1. Fortalecimento e ampliação do conhecimento sobre a Amazônia Legal (AL)

Apesar do crescente interesse e da produção de conhecimentos acumulada na região e em outros centros de produção científica e tecnológica e de inovação sobre a região, ainda persistem lacunas significativas relacionadas: ao conhecimento a respeito da sua imensa diversidade – "as Amazonas"– das oportunidades e dos desafios; aos seus povos; às comunidades; à ecologia; à biodiversidade; à bioprospecção; aos condicionantes ambientais, econômicos e sociais para a utilização sustentável dos recursos biológicos, entre outros temas. **Vale ressaltar que** a pesquisa existente, em geral, cobre apenas algumas partes da região e **poucas espécies presentes nessa região**.

Nas últimas décadas, temas ambientais – como o desmatamento, a degradação da floresta, a conservação e a restauração florestal, além de outros aspectos diretamente relacionados às mudanças climáticas – têm recebido crescente visibilidade, cobertura científica e atenção política, mas, mesmo nesses casos, são apontadas grandes lacunas de conhecimento e desafios para o enfrentamento dos problemas; em termos da dinâmica produtiva regional, cresceu, de forma importante, nas últimas décadas, a atração pelo aproveitamento econômico de recursos biológicos, processo que apresenta demandas importantes para seu avanço sustentável; quanto aos aspectos socioeconômicos, eles continuam pouco integrados às iniciativas de desenvolvimento, o que compromete a efetividade e a sustentabilidade das ações voltados para a Amazônia.[5] Homma (2012, p. 109) afirma que "[...] prevalecem as dificuldades para superar os problemas da pobreza, da educação, da saúde, da tecnologia agrícola e ambiental, muitas ainda utilizando tecnologias

4 Em cada cadeia, esses temas se desdobram em necessidades e demandas específicas, que se encontram nos relatórios para o projeto, mas não são apresentadas aqui devido aos limites do artigo.

5 Essa é uma questão muito mais ampla, não restrita à Amazônia, embora as condições regionais a tornem mais desafiadora. Relaciona-se com opções políticas e modelos econômicos prevalecentes no País, um debate que extrapola os limites deste artigo, mas que não pode ser esquecido.

neolíticas ou do século 19." Essas dimensões têm de ser vistas e tratadas de forma integrada nas estratégias e nos sistemas de produção.

Urge multiplicar muitos dos trabalhos já realizados ou em curso; promover e ampliar as pesquisas; buscar cobertura regional significativa, sempre considerando as diferenças intrarregionais que demandam olhares e estratégias correspondentes e adequadas. Dada a realidade regional, de grandes dimensões e multidiversa, esse é um processo escalonado e, ao mesmo tempo, dinâmico, com atuação permanente e integrada nos mais diversos níveis de gestão e diversidade de atores, nas mais diferentes condições e contextos, respeitando as múltiplas facetas e com decisões e modelos desenvolvidos localmente.[6]

Isso leva à necessidade de reconhecimento dos diversos territórios para orientar ações sustentáveis na região. Levantar, ampliar e organizar os conhecimentos sobre esses territórios, seus povos e seus recursos, disponibilizando-os de forma geoespacializada, é passo determinante para que o planejamento e as ações pavimentem e consolidem o caminho de um efetivo desenvolvimento sustentável.

Territorialização: a dimensão e a multidiversidade da Amazônia e a necessidade de buscar soluções adequadas aos diferentes contextos são aspectos centrais na construção de políticas e programas, na definição de pesquisas e oportunidades econômicas, bem como na devida caracterização de desafios, necessidades e potenciais dos diversos territórios. Esses fatores determinam abordagens, refletindo-se em todas as políticas setoriais.

No caso das cadeias com base nesses recursos, ainda que eles possam ocorrer em vastas e diversas áreas da região, não se podem traçar ações inteiramente válidas para todas essas áreas. Há diferenças de incidência, acessibilidade e características dos recursos disponíveis; de solos; da vegetação; de recursos hídricos; de aspectos sociais e culturais associados aos diversos povos. Esses fatores, em seu conjunto, determinam o tipo de oportunidades, obstáculos e possibilidades de aproveitamento sustentável desses recursos, bem como as demandas e as necessidades de investimentos, as formas de atuação, de seleção de prioridades, entre outros aspectos essenciais ao desenho e à implementação de estratégias para a organização e a consolidação dessas cadeias.

> Abordagens adequadas para concretizar os benefícios da bioeconomia na Amazônia devem ser discutidas considerando a pluralidade e a diversidade de ocupação amazônica e as principais vocações dos territórios e de suas populações tradicionais, em termos de conhecimento e uso dos recursos biológicos (Lopes *et al.*, 2023, p. 19).

6 "[...] Não existe fórmula a ser aplicada para toda a Amazônia [...]" (Pena Jr., 2011, p. 32).

Informação: escassez de dados e informações, bem como dificuldades relacionadas à disponibilidade e à qualidade das informações existentes – até mesmo, em estatísticas oficiais – são problemas apontados, de forma recorrente, na bibliografia, que causam insegurança e bases frágeis para políticas, planejamento, pesquisas e outras iniciativas.

A definição das informações necessárias, a busca e organização de dados existentes, o uso e a compatibilização de diversas fontes e metodologias, a definição de ferramentas e as formas de tratamento da informação são atividades de CT&I, que dependem da capacidade de estudos, pesquisas, capacitação, difusão, metodologias e instrumentos de geração, tratamento e disponibilização da informação.

Do ponto de vista das infraestrutura e das condições básicas para a melhoria da geração e do acesso à informação, fatores determinantes são as condições de conectividade – ainda deficientes ou inexistentes em muitas áreas da região; por sua vez, o baixo nível de escolaridade e de capacitação, em parte dos atores locais, representa outro obstáculo significativo, seja para geração e atualização de dados e informações, bem como para sua interpretação e uso na gestão de atividades locais e das cadeias em geral.

Mostram-se também fundamentais as informações sobre o próprio campo de CT&I – a capacidade existente, as carências e as necessidades de fortalecimento da base regional de CT&I, bem como o que se produz sobre a região em âmbito nacional e internacional – conhecimentos e tecnologias disponíveis e/ou em processo de desenvolvimento, inovações, pesquisas desenvolvidas e em curso, patentes, capacidades instaladas, fomento e financiamento, entre outros aspectos.[7]

No caso dos recursos biológicos, destaca-se a necessidade de estruturação e manutenção de bancos de dados abertos sobre os recursos e sobre as cadeias propriamente ditas – incluindo produtos derivados, condições de produção, estatísticas de produção, comércio, exportação, emprego, investimentos. É igualmente importante sistematizar informações relativas à legislação, aos requisitos sanitários, ao crédito e financiamento, à disponibilidade de serviços essenciais, à infraestrutura, entre outros aspectos estratégicos. Além disso, é fundamental mapear e divulgar experiências e projetos existentes na região, bem como metodologias e tecnologias disponíveis na área da informação, buscando uma compreensão mais abrangente do que já é utilizado, das complementações necessárias, das possibilidades de articulação e da interface entre essas experiências.[8]

Base regional de CT&I: responder às necessidades de pesquisas, tecnologias e inovação para a Amazônia requer uma base regional de CT&I forte, com capacitação, infraestrutura e melhorias

7 O Observatório da Indústria (ONI, 2024) destaca a importância de se ter o maior conhecimento possível sobre o que denomina de ativos de CT&I, tendo por base as atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I).

8 Uma das atividades em curso do projeto no CGEE é a construção de uma plataforma que agregue e disponibilize informações sobre a base de CT&I e sobre as cadeias de pesquisa e produção na Amazônia.

frequentes. "É preciso que o Estado fortaleça mais as instituições locais [...]. É preciso também interiorizá-las, ou seja, incluí-las na parte mais profunda da floresta amazônica brasileira" (Correa *apud* Hafiz, 2023); é necessária a criação de ecossistemas de inovação (RAISG, 2021).

Para isso, considera-se necessário: ampliar e fortalecer o fomento à pesquisa, garantir sua continuidade e constante ampliação para responder aos desafios e às dinâmicas regionais; promover formas de apoio à inovação; ampliar a participação do setor privado nos esforços de inovação; incentivar e apoiar a criação e consolidação de *startups*; ampliar e fortalecer o quadro profissional para CT&I na região; ampliar e fortalecer as redes de pesquisa; atrair pesquisadores para a região; fortalecer e garantir a manutenção da infraestrutura de CT&I; organizar e disponibilizar informações sobre os ativos de CT&I, sobre a base institucional, recursos humanos, infraestrutura, políticas, programas e projetos, tecnologias disponíveis, inovações, publicações; promover e apoiar o acompanhamento e a avaliação de políticas, programas e outros investimentos; promover e apoiar atividades que garantam a aplicação dos resultados das pesquisas e a adoção de tecnologias adequadas e sustentáveis. Nesse sentido, as atividades de difusão de conhecimentos, informações e transferência de tecnologias assumem papel estratégico.

Por sua vez, o fortalecimento da base regional e as atividades propriamente ditas de CT&I necessitam de cooperações e diálogo com outros atores, sendo necessário construir políticas e projetos participativos e em colaboração; as abordagens têm de ser transdisciplinares; pesquisas e outras ações integradas entre instituições de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I), assistência técnica, produtores agrícolas, industriais, organizações sociais e representativas das comunidades e dos povos da região; promover e apoiar a cooperação nacional e internacional em CT&I, com vistas à sustentabilidade da Amazônia, além dos impactos ambientais globais; fortalecer a cooperação entre os países amazônicos em temas de interesse comum. Essas cooperações devem ser paritárias e não somente uma forma de cessão de dados e consumo de produtos finais, ou seja, que promovam o crescimento conjunto de competências, informações, infraestrutura e PD&I.

3. Necessidades e demandas em CT&I comuns[9] às cadeias de produção

Ampliação do conhecimento, territorialização, informação e base de CT&I englobam aspectos abrangentes, essenciais para as cadeias, mas também para quaisquer outras iniciativas e políticas

9 A revisão foi realizada para cada uma das quatro cadeias inicialmente abordadas no projeto e, posteriormente, agrupados os aspectos e fatores comuns, destacados neste artigo, no qual seria impossível apresentar também necessidades e demandas peculiares de cada cadeia.

para a Amazônia. Nesta parte 3, destacam-se outros temas e atividades em CT&I,[10] diretamente relacionadas às cadeias com base em recursos biológicos e comuns entre elas.

Antes, porém, destaca-se a necessidade de um olhar crítico sobre a perspectiva das cadeias, sua viabilidade e os reais benefícios, em especial mediante a mais recente atração sobre a exploração econômica de recursos biológicos. A avaliação de oportunidades não pode se reduzir a prováveis retornos econômicos, nem se orientar por tendências ou ondas de mercado, bem como não podem se restringir aos próprios recursos e respectivas potencialidades. Ou seja, essa análise das oportunidades deve ser sobre conhecimentos mais abrangentes sobre a região, sobre o conjunto de opções, comparando-as do ponto de vista dos resultados e impactos necessários para o desenvolvimento regional sustentável em sua integralidade.[11] Os temas a seguir buscam cobrir esse escopo de atividades de CT&I intervenientes nas cadeias.

Desenvolvimento de produtos: a necessidade de melhoramento dos produtos existentes e, sobretudo, do desenvolvimento de novos produtos como fator impulsionador e de sustentabilidade das cadeias é uma constante na literatura revisada.

"A utilização muito marginal de ingredientes amazônicos não tem peso transformador na base produtiva, apesar do que dizem as propagandas – mas o desenvolvimento de produtos pela indústria com uso intensivo de matérias primas amazônicas, sim" (Idesam, 2024, p. 88).

Para os casos analisados, identificou-se uma multiplicidade de usos conhecidos, bem como indicações de potencial para outra gama de usos. Muitos dos conhecimentos e usos desses recursos fazem parte da cultura regional tradicional, do conhecimento dos povos locais, são importantes para a segurança alimentar e para a saúde das populações, além da produção de matérias-primas para as cadeias e da geração de renda. Em todas as cadeias, verifica-se a possibilidade de utilização integral dos recursos – incluindo de seus resíduos[12] –, de diversificação e de vários campos de aplicação.

Promover esse desenvolvimento demanda atividades bem estruturadas e contínuas de CT&I, com forte base institucional, organização, cooperação e apoio, com o comprometimento de diversos atores nos processos de inovação, pesquisa e difusão. Entre outras necessidades, destacam-se:

10 Temas e atividades em CT&I, sem dúvida, não se realizam apenas dentro desse campo e por suas iniciativas, mas precisam da interação e cooperação entre vários campos de atividade e políticas, sejam industriais, agrícolas, de gestão regional e de territórios, saúde, meio ambiente e outras.

11 Homma (2012, p. 107-108) "alerta para essa necessidade, tanto sob o ponto de vista dos recursos biológicos [...] falsas concepções [...], abandono de parte importante da biodiversidade, falta de tecnologias agrícolas e ambientais adequadas – com impactos negativos sobre os recursos naturais, renda e emprego –, bem como no que se refere às áreas para investimentos [...] esquecendo o potencial representado pela utilização das áreas já desmatadas."

12 O aproveitamento é essencial tanto para a sustentabilidade das respectivas cadeias, quanto para a sustentabilidade ambiental. Seu uso limitado, indevido ou simplesmente o descarte, acarreta perda de rendas e outros benefícios, muitas vezes afetando a viabilidade dos investimentos, além do acúmulo de problemas ambientais.

i) estímulo e apoio à inovação e à pesquisa direcionadas para as oportunidades associadas aos distintos recursos e às respectivas cadeias; ii) desenvolvimento da PD&I nos casos considerados de maior potencial; melhoramento dos recursos – melhoramento genético, pesquisas de bioativos e desenvolvimento de práticas agrícolas; iii) conhecimento sobre as culturas e os usos tradicionais dos recursos; iv) condições físicas, culturais, econômicas e sociais que afetam as atividades associadas ao adequado tratamento dos recursos; conhecimento das condições atuais de uso e potencial de mercado para cada produto – formas de utilização dos recursos e práticas produtivas; v) avaliações sobre a disponibilidade dos recursos e a viabilidade de sua exploração com sustentabilidade; vi) as capacidades e as estruturas disponíveis para desenvolvimento de produtos; aperfeiçoamento dos sistemas de produção; e vii) conhecimentos e tecnologias para o aproveitamento e a gestão de resíduos sólidos de forma sustentável. Todos esses esforços são fundamentais para identificação de potencialidades de novos produtos e melhoramento daqueles já explorados, devendo as necessidades ser observadas em todas as etapas de cada cadeia.

Também se inclui nesse tópico o desenvolvimento de tecnologias de produção agrícola e industrial[13] para outras atividades nas diversas fases das cadeias – melhoramento e desenvolvimento de equipamentos, técnicas, *softwares* e outros instrumentos para as fases de manejo, coleta/colheita, armazenamento, transporte, beneficiamento e comercialização, bem como equipamentos que tragam maior facilidade à produção, para novas apresentações e insumos – como embalagens. Avaliações mostram os impactos do desenvolvimento e da adoção de novas técnicas e equipamentos, com ganhos importantes para as cadeias.

Enfrentar os desafios com relação às dificuldades próprias do ambiente e/ou causadas pela situação dos trabalhadores, sobretudo para a coleta, exige equipamentos – em sua maioria, ainda muito precários ou improvisados – que contribuam para a qualidade e produtividade, evitando perdas hoje comuns e significativas; o ambiente, as distâncias e os riscos de perecibilidade tornam mais prementes os cuidados com a conservação dos recursos. Por sua vez, para maior produtividade, qualidade e sustentabilidade, são necessárias tecnologias de produção adequadas e acessíveis.

É importante conhecer e verificar os resultados e impactos de trabalhos e experiências já realizadas e/ou em curso, ir às fontes de conhecimento sobre os recursos, sobre as práticas de formas de aproveitamento e beneficiamento – empresas, *startups*, pesquisadores, organizações do terceiro setor, trabalhadores, e outros atores nas diversas cadeias – em um processo interativo para desenvolver PD&I necessárias ao melhoramentos e às inovações.

13 A carência é apontada por empresas como gargalo importante para o desenvolvimento e/ou aprimoramento de produtos (Codec/PA, 2023). A Embrapa, em cooperação com o Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC) (Embrapa, 2023), no quadro do Programa Mais Alimentos, está realizando um mapeamento de máquinas e equipamentos disponíveis para as cadeias de açaí, cupuaçu, babaçu e castanha-do-Brasil, bem como a identificação de necessidades tecnológicas e projetos de desenvolvimento já em curso.

O melhoramento e o desenvolvimento de produtos associam-se à garantia de qualidade – o que depende de conhecimentos sobre riscos e benefícios do uso de recursos, tecnologias, metodologias, técnicas e capacitação para exploração dos mesmos. Envolvem, ainda, segurança, durabilidade, atendimento a normas e requisitos sanitários e de mercados; agregam, também, as dimensões ambiental e social, com critérios de sustentabilidade.

A construção de boas práticas – resultantes da atenção de normas, procedimentos, tecnologias e outros aspectos que compõem as condições de qualidade – está associada ao tipo e à variedade dos recursos e abrange atividades em todas as fases das cadeias, desde as práticas de coleta, cultivo e manejo que possam garantir a qualidade da matéria-prima, passando por transporte, acondicionamento, processos industriais, conservação, até o consumo final.

Entre as demandas em CT&I para atender a essas condições, encontram-se: i) o desenvolvimento de boas práticas associadas a cada cadeia, a partir dos conhecimentos sobre os recursos e das normas estabelecidas pelos agentes sanitários, legais e de mercados específicos, bem como normas ambientais e sanitárias; ii) o conhecimento dos diversos mercados e seus requisitos; iii) a cooperação entre os agentes responsáveis nos vários segmentos que tocam as boas práticas – jurídico, sanitário, ambiental, PD&I, empresas, organizações de assistência técnica e trabalhadores, cujo conhecimento tradicional é importante para o conhecimento e o aproveitamento dos recursos; iv) a produção de manuais e outros materiais de difusão; v) a formação e capacitação de recursos humanos; e vi) as estratégias para difusão e capacitação. A difusão e adoção dessas práticas são uma das questões mais sensíveis quando se trata do aproveitamento de recursos biológicos para produtos de uso humano e animal. As condições humanas, sociais e de capacitação dos trabalhadores são fatores determinantes na aplicação delas, assim como a disponibilidade de infraestrutura, o acesso à informação e às tecnologias adequadas.

Instrumentos associados à qualidade têm se difundido como a certificação e identidade de origem, que requerem padrões de qualidade, sustentabilidade e rastreabilidade dos produtos.

A certificação é um instrumento de garantia da conformidade com essas regulamentações e de cumprimento de práticas social e ambientalmente sustentáveis. Ela depende da definição de parâmetros e critérios com base em conhecimentos e metodologias que sejam capazes de identificar a efetiva aplicação das boas práticas de produção e outros aspectos que garantam a qualidade, a origem e a sustentabilidade dos produtos.

Nesse sentido, cresce também em importância a condição de **rastreabilidade** das atividades e dos produtos das cadeias, sendo necessárias tecnologias, metodologias adequadas, conectividade e informações seguras. O desenvolvimento de ferramentas computacionais, de sensoriamento remoto, de aplicativos e *softwares*, o acesso a tecnologias de comunicação e conectividade

são vitais para a organização, o tratamento e o acesso às informações, "[...] o fator mais valioso para um efetivo rastreamento" (Leonelli; Toledo, 2006, p. 3). Os dados devem ser rapidamente comunicados – com tendência a processamentos imediatos e integrados, com disponibilização em tempo real. A vastidão regional, a dispersão – muitas vezes, isolamento – de comunidades, de áreas de execução de projetos, de coleta dos recursos, bem como a "falta crítica de dados sobre os processos produtivos na Amazônia" (FlordeJambu, 2023) tornam esse gargalo mais significativo.[14] Destaca-se ainda a necessidade de bases cartográficas de referência; de ferramentas adequadas aos diversos ambientes, sistemas de produção, objetivos e abrangência; e de recursos humanos e capacitação.

Essas atividades exigem articulação e comunicação eficientes entre todos os elos das cadeias,[15] dependendo de transparência, confiança e sistematicidade, de forma a facilitar o reconhecimento da atenção aos requisitos necessários, a identificação de problemas, de gargalos e, consequentemente, o planejamento de melhorias.

Pesquisas: é difícil classificar o tipo de pesquisa necessária ao aproveitamento dos recursos biológicos e do desenvolvimento de produtos deles derivados, uma vez que o caráter transdisciplinar é imperativo. Em todos os tópicos destacados anteriormente, depende-se de uma pesquisa forte, atualizada, transdisciplinar e cooperativa. As atividades das cadeias necessitam de conhecimentos, técnicas e metodologias de diversas áreas de pesquisa, como a pesquisa agrícola, química, de engenharia química, de engenharia florestal, de biologia, de ecologia, de ciências sociais, econômicas, entre outras, envolvendo muitas subáreas em cada uma delas, em abordagens integradas. Na impossibilidade de maior detalhamento nesse espaço, apresentam-se, resumidamente, algumas linhas destacadas nas referências.

A **pesquisa agrícola** e o **desenvolvimento de tecnologias agrícolas,** ainda, são considerados grandes desafios ao melhoramento dos recursos biológicos. Em específico sobre as cadeias, indica-se a necessidade de ampliação das pesquisas em temas, como aptidão agrícola de terras, mapeamento de solos, zoneamento agroecológico, monitoramento climático, melhoramento genético, produção de mudas, identificação botânica, identificação e controle de pragas e doenças, estudo de nutrientes, conservação, manejo e boas práticas, por exemplo.[16]

O desenvolvimento de sistemas agroflorestais, de sistemas integrados lavoura/pecuária e de outros similares ganha forte destaque nos esforços de promoção das atividades produtivas na agricultura e pecuária. As especificidades das cadeias devem ser observadas, de forma integrada,

14 Coloca-se a necessidade de evoluir para um sistema nacional de rastreabilidade, observando-se as especificidades regionais e dos diferentes sistemas de produção.

15 "[...] um efetivo sistema de rastreamento deve ter a capacidade de prover o 'caminho de ida' (*tracking*) e o 'caminho de volta' (*tracing*) de um produto e/ou informações pertinentes a ele" (Leonelli; Toledo, 2006, p. 3).

16 Para uma ideia mais ampla dessas necessidades, ver, entre outros, Pena Jr. (2011).

junto ao conjunto de outras culturas e atividades capazes de garantir sustentabilidade ambiental, social e econômica. É necessário associar culturas de acordo com as características e vocações de microrregiões. O conjunto de recursos explorados deve dar conta de uma atividade agrícola/extrativista/agroindustrial/pecuária que componha uma base sólida ao desenvolvimento sustentável das cadeias, bem como para as comunidades e povos que os produzem.

Estudos mostram a coexistência tradicional de diversas culturas e atividades. Outros avançam em demonstrar a necessidade, as oportunidades e os resultados de experiências de sistemas integrados que podem garantir produção adequada à biocapacidade da floresta (Felin; Feltran-Barbieri, 2023). É imprescindível fortalecer e ampliar esses esforços, seja considerando outros recursos e as possibilidades que apresentam para compor sistemas integrados, seja analisando microrregiões e/ou comunidades específicas, de acordo com suas condições e vocações em termos de aproveitamento produtivo dos recursos de que dispõem e mostrem potencial de exploração.

Para desenvolver esses sistemas, reforça-se a necessidade de atividades articuladas entre diversos campos da ciência, sem esquecer a necessidade de associação com os saberes tradicionais – de modo a se obter conhecimentos da forma mais integrada possível sobre os recursos que os compõem e sobre muitos fatores que intervêm nas diferentes culturas e atividades –, bem como mediante parcerias com trabalhadores, empresários e outros agentes que atuam de modo efetivo nos sistemas. Assim como em outros temas e atividades, é necessário garantir a transferência e promover o acesso a esses conhecimentos e tecnologias, o que significa forte esforço de capacitação dos trabalhadores, de crédito, de extensão rural e de garantia de assistência técnica. Apesar de haver instituições com trabalhos importantes nessa linha,[17] há carências e necessidade de ampliação dos serviços para atender aos produtores na diversidade e nas dimensões regionais.

Pesquisas voltadas ao controle sanitário, em particular sobre doenças e pragas, são outro destaque. Essa necessidade se reforça pelas novas condições a que são submetidas as espécies quando se intensifica sua exploração e, muitas vezes, se modificam os sistemas e as condições de produção. O monitoramento e o controle sanitário das culturas requerem também competências específicas e difusão sistemática de conhecimentos e tecnologias de forma que os agricultores, os silvicultores e os empresários possam atuar de modo adequado em prol de produtividade, qualidade e sustentabilidade.

O **melhoramento genético** tem papel fundamental para desenvolver qualidade, melhorar a segurança e aumentar a produtividade dos recursos e de seus derivados – ao desenvolver variedades mais resistentes a pragas e doenças, identificar variedades mais aptas a determinados climas, solos, consorciamentos, sistemas agroflorestais (SAF), além de prevenir a erosão genética e contribuir

17 A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), as organizações das redes da assistência técnica e gerencial (ATeG), da Assistência Técnica e Extensão Rural (Ater), o Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (Senar), entre outros.

para a conservação das espécies. Os impactos conhecidos dos esforços e desenvolvimentos em melhoramento genético, em muitas cadeias de produção, não deixam dúvidas sobre a importância do tema.[18]

> O melhoramento genético é o principal processo que transforma um componente da biodiversidade em um recurso genético e finalmente em um produto com valor econômico no mercado moderno. [...] é essencial porque é raríssimo encontrar um componente da biodiversidade que pode ser usado diretamente no processo produtivo sem ser transformado para adaptar-se ao processo. Isto não é uma deficiência da biodiversidade; é um requerimento da competitividade do mercado, pois o mercado exige alta qualidade com baixo custo, uma combinação raríssima na natureza. (Clement, 2001, p. 423).

Para a conservação da biodiversidade em geral, a informação genética e os bancos de germoplasma são vitais; para a consolidação das cadeias com base em recursos biológicos, a "integração de técnicas de melhoramento genético com práticas agrícolas e a adoção de tecnologias avançadas serão fundamentais para enfrentar esse desafio" (Oliveira *et al*., 2024, p. 12).[19] A continuidade, a ampliação e a regularidade das pesquisas nesse campo são necessidades frequentemente destacadas; são processos longos, com forte dependência de recursos públicos; demandam cuidadosa manutenção e conservação, equipamentos, *softwares*, pesquisas de campo constantes, capacitação e outros requisitos; e dependem de múltiplas capacidades, instituições e recursos humanos capacitados.

A pesquisa de bioativos é outra linha essencial ao conhecimento das propriedades dos recursos da biodiversidade e das oportunidades para seu aproveitamento em diversas aplicações e indústrias, para melhoramento e segurança de usos e produtos já existentes e, em especial, para o desenvolvimento de novos produtos. Essa pesquisa, no caso dos produtos amazônicos, é considerada escassa – seja em termos da variedade de espécies estudadas, seja para exploração de recursos específicos. Os esforços são considerados insuficientes para a bioprospecção[20] e para o aproveitamento da biodiversidade, sendo o Brasil o País com o menor número de patentes oriundas da bioprospecção de moléculas bioativas depositadas (Marques *et al*., 2022, p. 307).

18 Diniz (2010, p. 16) coloca que os recursos genéticos e os melhoramento constituíram-se no alicerce das pesquisas agrícolas no Brasil.

19 Recentemente, foi instituída a Política Nacional de Conservação e Uso Sustentável dos Recursos Genéticos para a Alimentação, a Agricultura e a Pecuária que, segundo o Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) (Brasil, 2024), tem base "[...] no desenvolvimento de uma Plataforma de Recursos Genéticos que será composta por: uma grande rede de atores que desenvolvem novas tecnologias de base genética; um sistema de informações sobre recursos genéticos conservados nas florestas, nas comunidades de produtores e nos bancos de germoplasma nacionais e três programas de conservação (*in situ*, *ex situ* e *on farm*)".

20 "[...] principalmente no Brasil, o qual nunca estabeleceu um programa expressivo, em nível nacional ou contrato para implantar uma rede nacional de bioprospecção no país, conforme ocorreu em outras nações [...]" (Marques *et al*., 2022, p. 293).

Além da identificação de propriedades, são necessárias avaliações, verificação da variabilidade de características físico-químicas e bioativos em diferentes condições de solo, clima, safras, etapa de processamento, entre outros; para uma efetiva aplicação, com segurança, há uma longa, complexa e onerosa P&D, havendo necessidade de apoio para infraestrutura de laboratórios, revisão do ambiente regulatório, capacitação, parcerias e cooperações para consolidação da P&D em âmbito mundial (Mattietto *et al.*, 2018; Figueiredo, 2014; Pretes, 2023).

A pesquisa ecológica tem especial destaque, uma vez que se trata, antes de tudo, do desenvolvimento sustentável da Amazônia, perspectiva que tem de estar na coluna dorsal das políticas e ações voltadas para a região. Há necessidade de avaliações com foco na sustentabilidade sobre opções e escolhas relacionadas à busca do desenvolvimento regional; avaliação de práticas e tecnologias agrícolas, bem como de processos industriais, quanto aos riscos ambientais e sociais, de médio e longo prazos; análises das cadeias como um todo, visando a conhecer, além do retorno econômico-financeiro, a contribuição para a conservação da biodiversidade, para a restauração e conservação florestal, bem como outras formas de apropriação e distribuição dos benefícios.

Monitoramento e avaliação do uso de agrotóxicos são temas para os quais se chama a atenção nessa área. Há preocupações também com o manejo intensivo – cada vez mais utilizado, que pode provocar desmatamento e apresenta riscos à sustentabilidade da produção e à biodiversidade – e com a análise dos impactos da expansão de explorações e culturas e práticas exercidas (Homma *et al.*, 2011). Indica-se a necessidade de conhecer os diferentes tipos de cultura ecológica e de orientações econômicas, com estudos mais aprofundados sobre essa diversidade e suas pressões sobre o meio ambiente, bem como a interação complexa dos fatores que explicam o quadro socioambiental da Amazônia.

Diversas questões que afetam a estruturação e dinâmica das cadeias aqui abordadas demandam contribuições de pesquisas e desenvolvimentos no campo das **ciências da saúde**, entre as quais: i) análises das condições sanitárias e de saúde das comunidades amazônicas, como enfermidades – muitas delas interferindo nas condições de trabalho –, disponibilidade e acesso a serviços sanitários básicos, nutrição e segurança alimentar; ii) qualidade dos produtos, como já enfatizado; saúde do trabalho – riscos ocupacionais, acidentes, impactos nas condições gerais de saúde; e iii) estudos farmacológicos e clínicos, em particular com relação ao desenvolvimento de medicamentos com base nos recursos biológicos. Além das pesquisas, há demandas importantes no que se refere à infraestrutura de laboratórios, à construção de normas e procedimentos, ao desenvolvimento de tecnologias e inovações.

Ciências humanas e ciências sociais aplicadas estão diretamente associadas aos desafios para o desenvolvimento integral da Amazônia, às questões de sustentabilidade, bem como a questões próprias das cadeias. As necessidades de pesquisa nessas áreas e sua contribuição para a estruturação

das cadeias de produção vão muito além das questões econômicas, em geral, mais visíveis – com relação à estrutura de produção e à dinâmica da economia, à estrutura, à dinâmica, ao papel e à inserção das cadeias na economia regional, nacional e internacional; a mercados e à viabilidade, entre outros temas importantes para o fortalecimento das estratégias de aproveitamento dos recursos.

As estruturas sociais e condições de vida, as formas de sobrevivência, os conhecimentos e práticas tradicionais,[21] a ocupação e uso da terra, a educação, entre outros aspectos, são importantes para a construção e implementação de políticas, estratégias de ação, definição de atividades, formas de organização e instrumentos para as cadeias. Conhecer essas condições, identificar problemas e desafios a elas relacionados e buscar soluções depende de estudos econômicos, sociais, culturais, jurídicos, em educação e outros dos campos das Ciências Humanas e Sociais (CHS) e Ciências Sociais Aplicadas (CSA).

São recorrentes as advertências para grandes desafios, entre os quais: i) pobreza; ii) significativas desigualdades; iii) dificuldades ou inexistência de acesso a serviços essenciais; iv) questão fundiária, em que se observam desigualdade, falta de legalização, obstáculos para cadastramento, invasões, gerando forte insegurança para investimentos e trabalhadores; v) condições de trabalho – riscos em muitas atividades, em especial para a coleta, no caso do extrativismo; vi) más condições e/ou impedimentos para o acesso aos recursos; vii) (in)segurança, práticas ilegais – como escravidão por dívida e trabalho infantil, roubo de coletas; viii) falta de condições para integração segura e participativa nas cadeias – baixo nível educacional, de capacitação, dificuldades de acesso a matérias-primas, equipamentos e insumos; e ix) frágil organização social nas comunidades – exceto em alguns casos exitosos –, entre outros gargalos e desafios. Não podemos deixar de mencionar a pressão de práticas não sustentáveis em várias atividades econômicas, da mineração ilegal e do narcotráfico.

É mister considerar que o agente por excelência nas cadeias ou em quaisquer outros processos de produção é o ser humano, são as populações que vivem e trabalham nos territórios e na comunidades, participantes dessas iniciativas e alvos diretos dos impactos delas advindos. Por justiça social, por seu papel e pelo conhecimento de que dispõem sobre os recursos, sobre a vida nas comunidades e na floresta, esses povos têm de ser ouvidos e ter participação ativa na formulação e implementação de políticas, na definição e demandas por linhas de pesquisa e nos esforços de desenvolvimento e inovação. Esses atores têm de ser integrados em todo o processo decisório, fortalecendo a necessidade da pesquisa e ação participativas, a denominada pesquisa-ação, ainda bastantes restritas.

21 Chama-se a atenção para o desconhecimento e/ou desconsideração dos saberes tradicionais e para a importância de integrá-los nos esforços para aproveitamento dos recursos da floresta. "Unindo saberes de povos tradicionais a modernas ferramentas biotecnológicas, como biotecnologia, genômica e nanotecnologia, os cientistas buscam na riqueza genética da biodiversidade brasileira a base para o desenvolvimento de tecnologias e produtos que possam melhorar a qualidade de vida da população". (Diniz, 2010, p. 22)

Assim, outras atividades destacadas neste artigo – como o desenvolvimento e uso de produtos, equipamentos e sistemas produtivos, a pesquisa, a difusão – necessitam levar em conta a realidade, os desafios, os direitos humanos e sociais, e os objetivos ambientais, ampliando-se o escopo da transdisciplinaridade e da colaboração entre os mais diversos campos do conhecimento.

Difusão e assistência técnica (AT): a difusão de conhecimentos e tecnologia já foi abordada em vários dos tópicos anteriores, mas merece destaque o papel da AT. Quando adequada e de ampla cobertura, é apontada entre os fatores de sucesso para os esforços e investimentos na exploração dos recursos biológicos. Apesar disso, é colocada entre os maiores desafios no caso das cadeias analisadas, apesar de esforços dos governos estaduais e alguns municipais, bem como da atuação de instituições de pesquisa e de outras organizações. No que se refere à CT&I, por um lado, atividades – como a difusão de tecnologias, capacitação, controle, geração de informações, busca dos conhecimentos tradicionais, acompanhamento de sistemas de produção e/ou da adoção de tecnologias, entre outras – são executadas, em boa parte, pela AT ou com sua colaboração direta; por outro lado, para seu bom desempenho, os serviços de AT demandam formação de profissionais atualizados quanto aos avanços científicos e tecnologias relacionadas às culturas das regiões em que atuam; formação em nível superior e nível técnico voltada para características, necessidades e demandas regionais; atividades de capacitação e atualização; equipamentos, *softwares* e outros instrumentos adequados às respectivas atividades. A colaboração entre AT, pesquisa, difusão e desenvolvimento de produtos e tecnologias tem de ser constante.

Gestão: para a gestão de sistemas produtivos, empreendimentos, programas, organizações sociais e da própria PD&I, há necessidade de metodologias e instrumentos cuja aplicação depende de atividades de desenvolvimento e adaptações conforme os alvos e objetivos. A formação de recursos humanos e a capacitação nessa área – considerada muito deficiente em grande parte das comunidades e dos projetos na Amazônia – também têm de ser permanente e apoiada por instrumentos da transferência e difusão de conhecimentos e tecnologias.

De modo particular, destaca-se a necessidade do acompanhamento e avaliação (A&A) dos esforços de organização das cadeias em suas várias dimensões. Trata-se de uma avaliação econômica, ambiental e social dos processos de exploração dos recursos, das estratégias de organização e do funcionamento das cadeias, dos avanços tecnológicos a elas associados. Entre outros aspectos, há necessidade de verificar: i) impactos – positivos e negativos – da expansão das culturas e dos sistemas de produção nos territórios, para as comunidades e populações ribeirinhas, agricultores familiares e povos da floresta em geral, bem como em aspectos que podem afetar populações urbanas, como segurança alimentar, por exemplo; ii) a distribuição de benefícios; iii) o grau e as condições de participação dos atores, participação dos trabalhadores e das comunidades no desenvolvimento dessa economia; iv) os avanços na valorização dos produtos e produtores na ponta inicial das cadeias e para trabalhadores nas demais fases; e v) a melhoria das condições de

trabalho, segurança, educação, saúde dos trabalhadores. Portanto, a gestão de políticas, programas e ações voltadas para as cadeias precisam incorporar o A&A não somente como atividade final, mas ao longo dos processos, de forma a permitir a identificação de problemas, o desvio de objetivos, os impactos não esperados e a revisão de rotas, se for necessário.

4. Conclusão

O fortalecimento de cadeias sustentáveis de pesquisa e produção na Amazônia Legal exige uma abordagem sistêmica, intersetorial e territorializada, sustentada por ações estratégicas de CT&I. A revisão da literatura revela amplo espectro de desafios científicos, técnicos e econômicos, mas, além desses, envolvem também dimensões ambientais, sociais, culturais e políticas, que demandam esforços coordenados entre instituições, comunidades e setor produtivo.

Há na região um número significativo instituições de ensino e pesquisa, de pesquisas em vários temas supradestacados, de experiências produtivas, de gestão e de atividades de difusão, com relevantes contribuições ao desenvolvimento regional e à organização das cadeias. Há, ainda, contribuições de outras instituições de PD&I no País e no exterior. No entanto, esses esforços são insuficientes, muito aquém do necessário diante da dimensão, da diversidade e da complexidade dos desafios.[22]

As demandas analisadas demonstram que são necessárias ações coordenadas em CT&I, alinhadas às especificidades territoriais, à valorização dos saberes locais, ao desenvolvimento e à aplicação de soluções tecnológicas contextualizadas, à consolidação de mecanismos eficazes de difusão, assistência técnica e gestão. Tais elementos, embora amplamente reconhecidos, são aqui sistematizados sob uma nova perspectiva, com foco na sua articulação transversal e na aplicabilidade do fortalecimento de cadeias produtivas sustentáveis.

A principal contribuição deste artigo está na capacidade de traduzir um acervo diversificado de conhecimentos e experiências em diretrizes operacionais e estratégicas, orientadas à formulação de políticas públicas e ações privadas mais integradas, factíveis e sensíveis à realidade amazônica. Ao organizar prioridades em CT&I de forma articulada, o texto oferece aos gestores e demais atores uma base qualificada para planejamento, tomada de decisão e construção de iniciativas multissetoriais.

22 "As iniciativas em C&T na Amazônia são pouco eficientes, há um abandono institucional na região. Não existe uma política nacional [...] a gestão do recurso [...] é fragmentada e falta um modelo de governança da unidade federativa [...]" (Waack, R.S. *apud* Safatle; Adeodat, 2024).

A construção de uma agenda estratégica efetiva para a Amazônia pressupõe o reconhecimento das especificidades territoriais, aliado a instrumentos de política científica e tecnológica que incorporem a complexidade ecológica, sociocultural e econômica da região. Isso requer investimentos adequados e contínuos para fortalecimento da base de CT&I regional, em pesquisa transdisciplinar, infraestrutura, qualificação de pessoas e arranjos cooperativos entre agentes locais, regionais, nacionais e internacionais. Requer também forte articulação entre níveis de governo, entre agentes públicos e privados, para que essa agenda seja respaldada por uma política integrada e abrangente. Mais do que uma conclusão, este artigo propõe um ponto de partida para desdobramentos setoriais e ações articuladas que alinhem a CT&I aos caminhos do desenvolvimento sustentável da Amazônia.

Referências

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária – Mapa. **Decreto institui a política nacional de conservação e uso sustentável de recursos genéticos para a alimentação, a agricultura e a pecuária**. MAPA, 4 jul. 2024. Disponível em: *https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/decreto-institui-a-politica-nacional-de-conservacao-e-uso-sustentavel-dos-recursos-geneticos-para-a-alimentacao-a-agricultura-e-a-pecuaria.* Acesso em: 4 out. 2024.

CLEMENT, C. R. Melhoramento de espécies nativas. *In:* NASS, L. L. *et al.* (Eds.). **Recursos genéticos & melhoramento – plantas.** Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso – Fundação MT, Rondonópolis, MT. p. 423-441. 2001. Disponível em: *https://antigo.inpa.gov.br/cpca/charles/pdf/spp-nativas.pdf*. Acesso em: 25 set. 2024.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DO PARÁ – CODEC/PA. **Codec apoia empresas e incentiva parcerias com Parque de Ciência (PCT Guamá).** 16 maio 2023. Disponível em: *https://www.codec.pa.gov.br/codec-apoia-empresas-e-incentiva-parcerias-com-parque-de-ciencia-pct-guama/.* Acesso em: 5 jul. 2024.

DINIZ, F. Aposta na genética para a produção de alimentos, **Especial Embrapa,** abril de 2010, p. 16-23, 2010. Disponível em: *https://periodicos.fgv.br/agroanalysis/article/download/26421/25280* Acesso em: 4 out. 2024

DINIZ, J. D. A. S. *et al.* Políticas públicas e projetos para o fortalecimento da cadeia de valor. *In:* WADT, L. H. O. *et al.* (Ed). **Castanha-da-amazônia**: estudos sobre a espécie e sua cadeia de valor. Brasília, DF: Embrapa, 2023. Disponível em: *https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1155597.* Acesso em: 27 dez. 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Embrapa e MDIC anunciam ações para promoção de máquinas e equipamentos para agricultura familiar e povos tradicionais da

Amazônia. **Agência Gov.**, 21 dez. 2023. Disponível em: *https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202312/embrapa-e-mdic-anunciam-acoes-para-promocao-de-maquinas-e-equipamentos-para-agricultura-familiar-e-povos-tradicionais-da-amazonia.* Acesso em: 7 set. 2024.

FUNDO AMAZÔNIA. **Valorizando cadeias produtivas amazônicas.** 2023. Disponível em: *https://www.fundoamazonia.gov.br/pt/projeto/Valorizando-Cadeias-Socioprodutivas-Amazonicas/.* Acesso em: 25 set. 2024.

FELIN, B.; FELTRAN-BARBIERI, R. Bioeconomia na Amazônia: os distintos impactos econômicos das cadeias do açaí e do cacau. **WRI Brasil**, 31 ago. 2023. Disponível em: *https://www.wribrasil.org.br/noticias/bioeconomia-amazonia-impactos-economicos-cadeias-acai-cacau.* Acesso em: 2 jul. 2024.

FIGUEIREDO, R. V. *et al.* Açaí Passado: avaliação de compostos bioativos post fermentação espontânea. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPOSTOS BIOATIVOS, 2014. **Anais eletrônicos...** Campinas, Galoá, 2014. Disponível em: *https://proceedings.science/sbcb/papers/acai-passado-avaliacao-de-compostos-bioativos-post-fermentacao-espontanea?lang=pt-br* Acesso em: 29 jul. 2024.

FLORDEJAMBU.com. **Rastreabilidade de cadeias produtivas na Amazônia:** desafios e oportunidades. FLOR de AMBU com produtos da Amazônia. 2023. Disponível em: *https://flordejambu.com/blog/rastreabilidade-de-cadeias-produtivas/* Acesso em: 25 set. 2024.

HAFIZ, M. Desenvolvimento sustentável na Amazônia: colaboração, pesquisa e financiamento na América Latina. Proteção ambiental é um passo importante no desenvolvimento econômico da região. **Cienc. Cult**. v. 75, n. 3, p. 1-4. 2023. Disponível em: *https://revistacienciaecultura.org.br/?p=4748.* Acesso em: 2 set. 2024.

HOMMA, A. K. O. Ciência e Tecnologia para o desenvolvimento rural da Amazônia. **Parcerias Estratégicas**, v. 17. n. 34, p. 107-130. 2012. Disponível em: *http:www.cgee.org.br/parcerias.* Acesso em: 10 out. 2024.

HOMMA *et al.* Açaí: novos desafios e tendências Amazônia. **Ciência & Desenvolvimento**, Belém, PA, v. 1, n. 2, p. 7-23, jan./jun. 2006. Disponível em: *https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/578153.* Acesso em: 25 set. 2024.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SOCIO-AMBIENTAL, PRESERVACAO E ECOLOGIA DA AMAZONIA – IDESAM. **Caminhos para o fortalecimento de cadeias produtivas da sociobiodiversidade amazônica.** Melhores práticas nos elos das cadeias produtivas da castanha-do-Brasil e do cacau. 2024. Disponível em: *https://idesam.org/wp-content/uploads/2024/02/IDESAM-CASTANHAeCACAU-MelhoresPraticas-estudo_resumo.pdf.* Acesso em: 4 ago. 2024

LEONELLI, F. C. V.; TOLEDO, J. C. de. Rastreabilidade em cadeias agroindustriais: conceitos e aplicações. **EMBRAPA, Circular Técnica** 33, São Carlos, outubro 2006. Disponível em: *https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPDIA-2009-09/11845/1/CiT33_2006.pdf.* Acesso em: 1º out. 2024.

LOPES *et al.* Visões sobre bioeconomia na Amazônia: Oportunidades e desafios para a atuação da Embrapa. **EMBRAPA, Documentos 10**, agosto 2023. Disponível em *https://www.embrapa.br/documents/10180/0/Visões+sobre+bioeconomia+na+Amazônia+-+Oportunidades+e+desafios+para+a+atuação+da+Embrapa/4c6c1945-coec-48fc-68fe-420288bedcee.* Acesso em: 31 jul. 2024.

MARQUES, L. G. A. *et al.* The impact of bioprospecting for discovery of new drugs. **Revista Fitos.** Rio de Janeiro. Supl. n. 2, p. 293-314. 2022. Disponível em: *https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/51651.* Acesso em: 5 ago. 2024.

MATTIETTO, R. A. *et al.* Teores de compostos bioativos em amostras de açaí comercializados em Belém/Pará durante safra e entressafra. *In:* CBCTA 2018, 36., p. 13-16 de agosto de 2018, Belém/PA. **Anais...** Disponível em: *https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/192822/1/acai-4096-12072018-150917.pdf.* Acesso em: 29 jul. 2024.

OBSERVATÓRIO NACIONAL DA INDÚSTRIA – ONI. **Atlas da inovação.** 2024. Disponível em: *https://www.portaldaindustria.com.br/canais/observatorio-nacional-da- industria/produtos/atlas-da-inovacao/.* Acesso em: 22 nov. 2024.

OLIVEIRA, M. dos S. *et al.* Melhoramento genético em cupuaçuzeiro: avanços recentes e desafios futuros. **Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 17, n. 9, 2024. Disponível em: *https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/11007.* Acesso em: 3 out. 2024.

PENA Jr., M. A. G. Demandas de pesquisa para a Amazônia Legal. **EMBRAPA, Documentos de Apoio,** 3, agosto 2011. Disponível em *https://www.alice.cnptia.embrapa.br.* Acesso em: 4 out. 2024.

PRETES, G. A. C. *et al.* Bebida do caroço de açaí *(Euterpe oleracea mart)*: estudo do efeito da torrefação nas características físico-químicas e bioativas. *In:* CONGRESSO INTERNACIONAL DA AGROINDÚSTRIA/CIAGRO 2023, 26 e 27 de julho. **Anais...** 26 e 27 de julho, 2023. Disponível em: *https://ciagro.institutoidv.org/ciagro2023/uploads/428.pdf.* Acesso em: 29 jul. 2024.

REDE AMAZÔNICA DE INFORMAÇÃO SOCIOAMBIENTAL GEORREFERENCIADA – RAISG. **Amazônia 4.0**: a criação de ecossistemas de inovação e o enraizamento de uma nova bioeconomia. Entrevista especial com Carlos Nobre. Disponível em: *https://www.raisg.org/pt-br/radar/amazonia-4-0-a-criacao-de-ecossistemas-de-inovacao-e-o-enraizamento-de-uma-nova-bioeconomia-entrevista-especial-com-carlos-nobre/.* Acesso em: 4 jan. 2022.

SAFATLE, A.; ADEODATO, S. Uma estratégia de CT&I para reimaginar o Brasil, a partir da Amazônia. **Reportagem, P22,** 31 de janeiro de 2024. Disponível em: *https://pagina22.com.br/2024/01/31/cti-na-amazonia-e-hora-de-criar-pontes*/Acesso em: 15 nov. 2024.

Inovações e planejamento territorial na convivência com a seca e a desertificação: pontos para a reflexão e ação (em 2025, ano da III Conferência ICID/UNCCD e 30ª COP/UNFCCC)

Antonio Carlos Filgueira Galvão[1]

Resumo

As mudanças climáticas globais tornam a convivência com a seca uma questão crucial para a sobrevivência e o bem-estar das populações de vastas áreas do planeta. Mitigar os efeitos da elevação da temperatura e suas consequências, em especial para estruturas ambientais e socioeconômicas menos abastadas e frágeis, é um desafio de peso. Para isso, cabe pensar um planejamento territorial que contemple: estratégias efetivas de atuação sobre os impactos esperados; e a adaptação dos territórios para conjugar práticas tradicionais com inovações capazes de propiciar uma transição sociotécnica voltada ao

Abstract

Global climate change makes coexistence with drought a crucial issue for the survival and well-being of populations across vast areas of the planet. Mitigating the effects of rising temperatures and their consequences, especially for less affluent and fragile environmental and socioeconomic structures, is a significant challenge. To achieve this, it is necessary to develop territorial planning that encompasses effective strategies for addressing expected impacts and adapting territories to combine traditional practices with innovations that foster a sociotechnical

1 Doutor em Economia Aplicada (meio ambiente, espaço e desenvolvimento) pelo Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas (IE-Unicamp). Mestre em Teoria Econômica pelo Instituto de Pesquisas Econômicas (IPE) da Universidade de São Paulo (USP). Bacharel em Economia pela Universidade de Brasília (UnB). Membro da Associação Brasileira de Economistas pela Democracia (Abed). Consultor em Economia/Políticas Públicas. Analista de Ciência e Tecnologia aposentado do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Ex-diretor do CGEE.

desenvolvimento sustentável. A *expertise* adquirida pelo Brasil pode auxiliar outros países nesse caminho. Assim, o presente artigo foi preparado para cumprir um duplo objetivo: a) apoiar o debate sobre as terras secas na 3ª Conferência Internacional sobre Clima e Desenvolvimento em Regiões Áridas, Semiáridas e Subúmidas Secas (ICID III), realizada em setembro de 2025, em Fortaleza (CE); e b) apoiar a contribuição do CGEE aos debates da trigésima Conferência das Partes (COP30) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (CQNUMC ou UNFCCC, na sigla em Inglês), realizada em novembro do mesmo, em Belém (PA).

Palavras-chave: Mudança climática. Semiárido. Seca. Planejamento territorial.

transition toward sustainable development. The expertise acquired by Brazil can assist other countries on this path. This article fulfill a dual objective: a) to support the debate on drylands at the Third International Conference on Climate and Development for Arid, Semi-arid and Sub-humid regions (III ICID), an international conference held in September, 2025 at Fortaleza, Ceará, Brazil; b) to support the CGEE's contribution to the debates of the Thirtieth Convention of the Parties of the United Nations Climate Change Conference (COP30/UNFCCC), in November, 2025, at Belém, Pará, Brazil.

Keywords: *Climate change. Semi-arid regions. Drought. Territorial planning.*

Introdução

Nesses tempos de COP30 no Brasil, realizada em Belém, uma das capitais da Amazônia brasileira, a temática da floresta emerge com força nas discussões acerca das Mudanças Climáticas, do Meio Ambiente e do Desenvolvimento Sustentável.

Biodiversidade, manejo florestal, ciclos hidrológicos únicos e vários temas associados parecem inclinados a dominar a agenda, direcionando nosso olhar para as terras úmidas e a maior floresta equatorial do planeta.

Colocado o tema em perspectiva dinâmica, no entanto, o assunto é puxado para os níveis de desmatamento, o ponto de inflexão da resiliência, a capacidade de sustentação da cobertura florestal, para a aridização e as secas, que vêm se tornando mais frequentes. Esses fenômenos parecem avançar inexoravelmente sobre a mata verde exuberante de outrora.

Alguns podem se surpreender com o espaço da temática das terras secas na COP30, posto que, como vem alertando a Convenção das Nações Unidas para o Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (UNCCD), o mundo caminha por um momento de perdas sistemáticas das terras úmidas em favor de terras de maior aridez. Embora sujeita a alguma controvérsia e debate, a UNCCD (s/d) esclarece um aspecto estruturante das mudanças climáticas:

> Vastas áreas do mundo apresentaram aumento na aridez nas últimas décadas, em particular, o oeste dos Estados Unidos, o Brasil, a maior parte da Europa, a Ásia (especialmente a Ásia oriental) e a África central. Enquanto isso, menos de um quarto das terras globais (22,4%) experimentaram uma tendência de aumento da umidade, incluindo áreas no centro dos Estados Unidos, a costa atlântica de Angola e o sudeste da Ásia do Pacífico (ou seja, Malásia, Indonésia e Filipinas). Espera-se que a aridez continue a aumentar no futuro com alterações climáticas. As projeções climáticas para os cenários de altas emissões mostram mudanças notáveis em direção a classes mais secas e até mesmo uma mudança de terras não áridas para terras áridas, em pontos críticos como o Centro-Oeste dos Estados Unidos, o centro do México, o norte da Venezuela, o nordeste do Brasil, o sudeste da Argentina, toda a região do Mediterrâneo, a região costeira do Mar Negro, grandes partes do sul da África e o sul da Austrália (tanto a costa oeste quanto leste). Não há projeções que indiquem a passagem de uma área da condição de terras áridas, no passado, para úmidas, no futuro. Em vez disso, aumentos nas classes semiáridas e subúmidas secas são esperados para todas as regiões (tradução nossa).

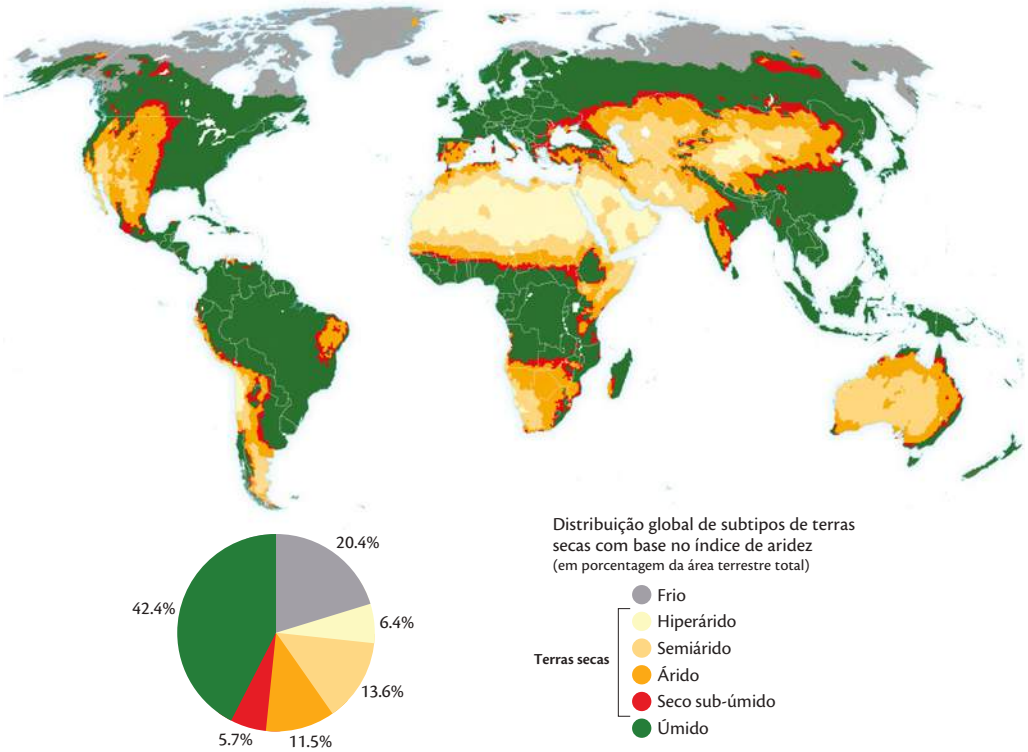
A questão das terras secas, portanto, permeia o coração do debate sobre a mitigação e adaptação às mudanças climáticas, ou seja, as ações de políticas públicas para se lidar com tais processos. Trata-se de um tema que envolve quase que obrigatoriamente um contexto sociopolítico específico, pois demanda compreender as interações que se produzem entre clima, meio ambiente e estruturas socioeconômicas correspondentes. E, no caso brasileiro, o debate possui uma expressão mais recente nas secas da Amazônia e do Pantanal e outra, mais antiga e persistente, relativa ao Semiárido nordestino que, cada vez mais, vai incluindo pedaços do Sudeste do País.

O objetivo do trabalho é explorar as perspectivas de avanço no desenvolvimento sustentável da região, revisitando aspectos relevantes da atuação das políticas públicas para o Semiárido nordestino. Trata-se de um tema de elevada repercussão e impacto no País, que instiga o imaginário desde que nos tornamos nação independente e ajuda a levantar questões para as terras secas do planeta.

1. Dinâmica recente das zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas

As terras secas, no mundo, compreendem um mosaico de referências, lugares e estórias que povoaram e povoam o imaginário da geografia e da história mundial, sempre a relacionar o homem e sua capacidade de sobrevivência e convivência com essas intempéries climáticas. O Mapa 1 apresenta a distribuição global completa das terras com climas hiperáridos (desertos), áridos, semiáridos, subúmidos secos, úmidos e frios pelo planeta, realçando a proporção avantajada das terras secas – hiperáridas, áridas, semiáridas e subúmidas secas.

O espectro de situações, terras hiperáridas, áridas, semiáridas e subúmidas secas, aponta para fenômenos, ecossistemas e sistemas sociais diversos, sobre a mesma matriz da aridez, da disponibilidade e do acesso à água. Adianto, porém, que outras dimensões, sobretudo relacionadas às estruturas sociais e políticas, cobram um espaço crescente na adequada caracterização dessas questões.



Mapa 1. Distribuição global das classes de clima entre os períodos de 1951-1980 e 1981-2010

Obs.: Esses mapas são baseados em dados computados usando médias de 30 anos da relação P/PET. Índice de aridez (IA) = $\sum_{i=1}^{30} [P_i / PET_i] / 30$, onde i denota o ano i. O IA é apresentado em uma grade global de 0.5°, processada pelo *Joint Research Center* (JRC) da União Europeia usando dados de precipitação da *Full Data Reanalysis (v6.0).* P/PET refere-se à relação entre a precipitação média anual (P) e a evapotranspiração potencial anual (PET), ou seja, mede a quantidade de chuva num período com relação à quantidade de água que seria transferida para a atmosfera, por meio da evaporação do solo e da transpiração das plantas, se houvesse um suprimento ilimitado de água nesse mesmo período. Esse é o Índice de Aridez, que é uma característica climática.

Fonte: UNCCD, s/d; a partir de Global Precipitation Climatology Center e dados de evapotranspiração potencial do Climate Research Unit of the University of East Anglia (UNIT et al., 2013) (CRUTSv.3.20), modificados por Spinoni J.(2015) [AP] apud JRC World Atals of Desertification.

As terras secas, segundo análises mais recentes, ocupariam, na atualidade, cerca de 70% da área dos continentes ou das áreas emersas, tendo aumentado sua expressão terrestre entre 1990 e 2020 (UNCCD, s/d). Em outras palavras, o mundo perdeu, por vários motivos, um volume significativo de terras úmidas nos últimos anos, mas quase invariavelmente pela ação danosa dos seres humanos. Em decorrência deste cenário, foram reduzidas as condições para a produção agrícola, aumentadas as erosões, ampliadas as complicações respiratórias e tornadas mais frequentes as migrações indesejadas, além de outros efeitos importantes.

Há um debate entre ciência e política que coloca em discussão a perspectiva do avanço da desertificação, ou seja, da degradação de terras em áreas não desérticas (IPCC, 2023; UNCCD, s/d). No entanto, em tempos de reconhecidas mudanças climáticas, há que se adotar cautela na formulação de conclusões precipitadas. Os que professam crença nos fundamentos da mudança climática tendem a deixar de lado aspectos relevantes da intervenção humana e, muitas vezes, pensam a questão como algo que transcende nossa capacidade de alterar os rumos do processo. O melhor é reconhecer que a desertificação é complexa, combinando fatores climáticos e processos socioeconômicos, de uma maneira singular que precisa ser decifrada.

Naquele período coberto pelos dados no Mapa 1, as terras secas já perfaziam cerca de 67,6% das superfícies terrestres do globo. Note-se que as áreas vermelhas, alaranjadas escuras e alaranjadas mais claras cobriam a quase totalidade da Oceania e do Oriente Médio; todo o norte da África - incluindo aí a porção hiperárida do Saara -; vastas porções da Ásia Central; sul da Rússia; noroeste da China e Mongólia; parte expressiva da ponta sul da África; uma extensa faixa que corta diagonalmente a América do Sul, desde o norte do Chile e o sul da Bolívia, cruzando pela Argentina até sua faixa central; o Semiárido brasileiro; e, por fim, larga faixa da costa oeste da América do Norte, que corta do norte do México até o sul da Califórnia e outros estados dos EUA, chegando até o Canadá.

2. Breve incursão pelas características do Semiárido brasileiro

Nossa visão das terras áridas, semiáridas e subúmidas secas é marcada pelo caso da Região do Nordeste do Brasil, como nos lembram os compêndios tradicionais, que acrescentam se tratar da zona semiárida mais povoada dentre as equivalentes no planeta (Furtado, 1998, p. 16). O imaginário brasileiro está preenchido pelas imagens de retirantes sertanejos com o sofrimento estampado na face, a perambular diante da dificuldade de sobrevivência nos anos de seca; da vegetação singular da Caatinga com cactos cheios de espinhos e mandacarus enquadrando o gado esquálido; e de vaqueiros de chapéu e roupas de couro, tudo com o sol a pino a derreter as ideias e enrijecer os corações. A região tem uma história singela e resiliente.

Uma história que é bem registrada em romances, contos e poemas consagrados na literatura do País[2]. Como dizia Euclides da Cunha, de "Os Sertões", publicado pela primeira vez em 1902, "O sertanejo é antes de tudo um forte!" (Cunha, 1946). Porém, tais imagens têm se dissipado cada vez mais, desde pelo menos a virada para os anos 2000.

Em outras palavras, ainda que estejamos falando de terras secas e solos cristalinos, restrição de acesso à água, vegetação de caatinga e demais atributos edafoclimáticos - como se costumava definir antigamente, ou seja, atributos de solo e clima necessários ao bom desenvolvimento das plantas, animais e seres humanos -, a expressão maior do fenômeno incrustado na mente dos brasileiros deriva do homem e de sua constante luta pela sobrevivência em tais condições. São as relações humanas que devem mudar, ampliando a convivência com o ecossistema.

Uma citação clássica de Furtado (1989, p. 22 e 23), incluída na abertura do *Plano de desenvolvimento sustentável do Semiárido (PDSA)* (Brasil, 2006), primeiro exclusivamente dedicado à região, ilustra bem os elementos histórico-estruturais e os desafios regionais:

> *A sociedade que emergiu na zona semiárida, cujo povoamento deu-se com base na pecuária extensiva, tinha como traços característicos a dispersão espacial dos camponeses e a total dependência destes com respeito aos proprietários de terras. [...] As sociedades que não realizaram qualquer investimento no fator humano até os albores do século atual foram condenadas às piores formas de subdesenvolvimento [...].*

Furtado foi além e firmou posição contrária à das elites, pois "[...] as secas, o fenômeno social das secas, é consequência dos problemas do Nordeste. [...] Ou se mexe nas estruturas, ou não se enfrenta a questão nordestina [...]" (Araújo, 2000, p. 76).

De fato, a região constitui um tema usual da análise acadêmica, cujo lastro reside no debate que transitou de uma ascendência inicial do problema visto como escassez de água, para o qual a solução técnica seria embasada pela engenharia de barragens e açudes, para outra visão, focada sobre o elemento humano, cuja solução incidia sobre a mudança das relações sociais e das condições de subdesenvolvimento/desenvolvimento. Ou seja, passou, ao longo do século 20, de uma solução técnica para outra sociopolítica (GTDN, 1978). Ademais, a convivência com a seca, longe de ser uma questão inatingível, representa o caminho a perseguir para que se possa operar uma transformação que possibilite aos habitantes viver em condições dignas e satisfatórias.

2 Disso, já bem lembrava o professor Francisco de Oliveira, no seu livro poema Elegia para uma re(li)gião (Oliveira, 1977). Um começo pode ser a leitura do livro O Sertão, o Boi e a Sêca: Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, da Coleção Histórias e Paisagens do Brasil, volume II. (Bruno, 1959), que compila trechos de clássicos – Rachel de Queiroz, Henry Koster (traduzido por Luís da Câmara Cascudo), José de Alencar, dentre outros autores e viajantes estrangeiros sobre a região -.

O Semiárido brasileiro compreende, na atualidade (Mapa 2), uma extensão territorial de 1.335.298 km², que abrange 1.477 municípios de 11 estados (Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia, Minas Gerais e Espírito Santo)[3]. Possui uma população estimada de 31 milhões de habitantes.

Do ponto de vista climático, é marcado, no geral, por índices pluviométricos baixos - inferiores a 850 milímetros (mm) -, distribuição espaço-temporal das chuvas extremamente irregular, índice de aridez abaixo de 0,5 e déficit hídrico superior a 60% na média dos dias de cada série temporal de cerca de 30 anos. Tudo isso configura a região como sendo de elevada vulnerabilidade hídrica.

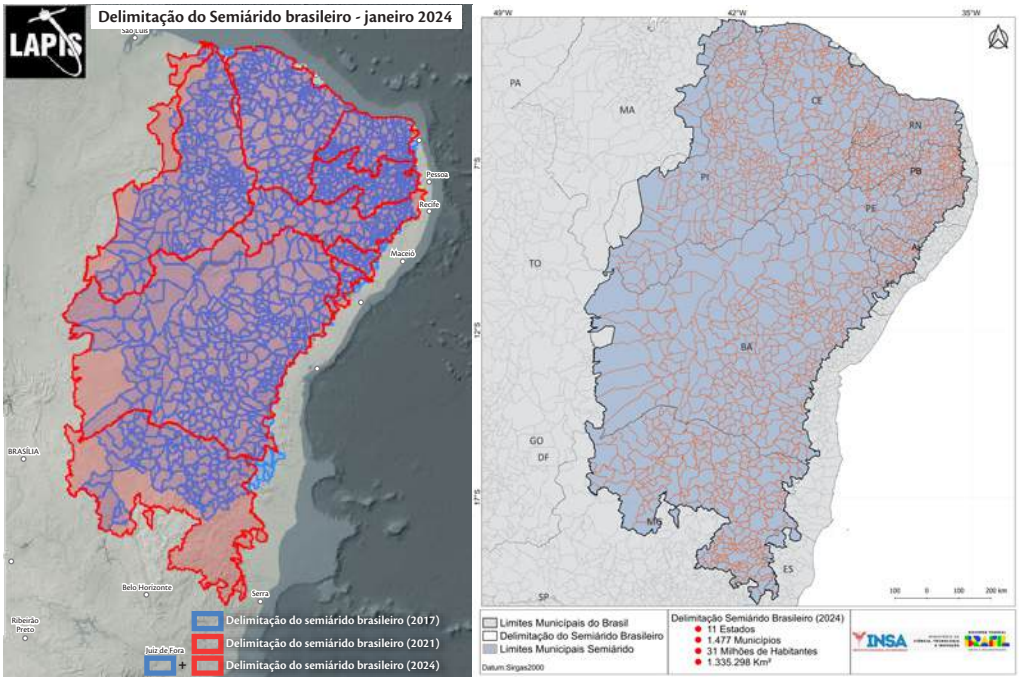
Na região Semiárida, registravam-se mortes nos períodos de seca, até que as políticas públicas lograram, mais recentemente, eliminar o problema por meio da oferta de ajudas sistemáticas que passaram a alcançar diretamente os beneficiários, em particular, em seu poder aquisitivo. Desde a seca de 1993, não há mortes por consequência das intempéries na região (Carvalho *et al.*, 1994).

De acordo com dados do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) (Brasil, 2016), porém, a região tende a ser duramente afetada pelas transformações em andamento. São previstos, até o final deste século, aumentos de temperatura entre 2 e 4 graus Celsius, elevação concomitante da evapotranspiração e redução na disponibilidade de água, bem como maior frequência e intensidade de eventos extremos, secas e cheias.

As mudanças climáticas trarão agravamento nas questões de degradação de terras, desertificação e secas, talvez já sendo refletidas nos acréscimos sistemáticos do número de munícipios incluídos no Semiárido. Estes, ainda nesse século, passaram de 1.133 municípios, em 2005, para 1.262, em 2017; 1.427, em 2021; e, mais recentemente, em 2024, para 1.477. A área total evoluiu de 982.563,3 Km², em 2005, para 1.335.298,0 Km², em 2024.[4]

3 O Brasil constitui uma federação trina: União, Estados - e o Distrito Federal (DF) - e municípios. Dizem os cientistas políticos que se trata da única federação trina do mundo, pois o município é um ente autônomo definido constitucionalmente. Não se trata de simples descentralização, como soe acontecer com alguns países, o que traz implicações importantes para a política.

4 Brasil (2005) e Sudene (2024). Vale especular que tais inclusões de área e municípios também podem ter ocorrido por pressões políticas, dadas as vantagens financeiras obtidas por se integrar a região.



Mapa 2. Municípios integrantes da Região Semiárida (2017-2021-2024)

Fontes: 1) à esquerda, Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélites (Lapis) da Universidade Federal de Alagoas (Ufal) (Ufal, 2024); 2) à direita, Instituto Nacional do Semiárido (Insa) (Insa, 2024).

Na prática, os impactos das mudanças climáticas somam-se a outras transformações que pressionam ainda mais os recursos naturais. Por exemplo, no plano econômico, a atividade agrícola de sequeiro, em especial a praticada por pequenos produtores com ou sem terra, tenderá a ser mais afetada; a agricultura tradicional também, posto que se espera que o período chuvoso fique mais curto. Outrossim, com a redução das perspectivas agrícolas, minguam as oportunidades de ocupação e obtenção de renda, o que, aliado à menor disponibilidade de água, provoca impactos sociais inequívocos, deteriorando as condições de vida. A expectativa de uma pressão intensa sobre o bioma Caatinga parece igualmente provável no plano ambiental, dada a ampliação das áreas sujeitas à desertificação. Uma seca mais severa tenderá a ter um impacto maior sobre uma área degradada ou desertificada, porque a capacidade de resiliência do ecossistema e das pessoas (em geral, há ali mais pobreza) será menor.

Uma fração expressiva das terras secas, estimam os especialistas, já estão degradadas e sob algum grau de risco. O avanço das mudanças climáticas e os usos inadequados da terra podem comprometer uma trajetória de melhor convívio com a semiaridez e as secas, apesar dos esforços recentes desenvolvidos por políticas públicas em várias frentes.

Nota técnica recente do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) e do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), referenciada pela Revista Pesquisa Fapesp, publicada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), registra a passagem inédita da condição de semiaridez para outra de aridez em uma área do Centro-Norte da Bahia, na divisa com Pernambuco (Pivetta; Fontanetto, 2024).

O elemento crítico do cenário do Semiárido, cabe não esquecer, é o humano, pois, além do mais, tem a prerrogativa de influenciar os rumos futuros dos processos relevantes na região, inclusive para mitigar as mudanças climáticas e minorar os danos ao meio ambiente.

Tomando-se um indicador composto, o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (Pnud), no âmbito municipal, o Brasil apresenta, para o ano de 2021, um valor médio de IDHM[5] de 0,766, que o situa na faixa de países com alto valor nos padrões globais[6]. Porém, o número esconde uma grande variação, reflexo das tradicionais desigualdades sociais e regionais. As unidades municipais do Semiárido registram valores bastante inferiores aos dessa média e da média da própria região.[7]

Pelo ângulo dos Estados, Maranhão (0,676) e Alagoas (0,684) representam as unidades da Federação mais mal colocadas no País, na base do IDHM (Pnud, 2025). No plano municipal, os IDHM mais baixos encontram-se no Norte e Nordeste do Brasil. Dentre os 30 menores IDHM do País (dados relativos a 2021), 13 encontram-se no Nordeste, dos quais, 11 no Semiárido, sendo 5 no Piauí, 2 no Maranhão, 2 em Alagoas, 1 na Bahia e 1 em Pernambuco.

O índice de Gini[8] aponta para os estados com maior desigualdade na distribuição da renda, segundo dados de 2024 da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (Pnad Contínua) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), compilados pelo Ipea (IBGE, 2025): Pernambuco (0,532), Rio Grande do Norte (0,525) e Alagoas (0,518), todos com parte expressiva do território incluída no Semiárido, estão entre os seis mais desiguais do País.

Segundo o Banco do Nordeste do Brasil (BNB) (BNB, 2023), em nota técnica sobre os primeiros dados da apuração do último Censo Demográfico de 2022 (IBGE), o número de habitantes do

5 O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) brasileiro é composto pelas mesmas três dimensões do IDH Global – longevidade, educação e renda – mas, vai além: adequa a metodologia global ao contexto brasileiro e à disponibilidade de indicadores nacionais. Os resultados no IDH Global não são comparáveis com o IDHM nacional (ATLASBR, 2025). Acesso em: 29/10/2025.

6 O Indicador é normalizado, sempre representando número entre 0 e 1, sendo o mais próximo de 1 o mais elevado. Há, para registro, outra categoria acima: muito alto, que congrega a maioria dos países desenvolvidos.

7 Theodoro (2022), em uma panorâmica histórica da questão racial ou dos negros no Brasil, disseca as raízes mais fundas das desigualdades sociais brasileiras. Para desigualdades regionais, ver Cano (1998; 2007) e Diniz (1993).

8 Índice de concentração de renda que mede o desnível entre o rendimento dos mais ricos e dos mais pobres – comparação entre os 20% mais riscos e os 20% mais pobres. O índice varia entre 0 (zero) e 1 (um): quanto mais próximo de 0, menor é a desigualdade de renda; quanto mais próximo de 1, pior é a distribuição da renda.

Semiárido – lembrar que área e população eram então menores que as atuais – havia crescido ligeiramente, de aproximadamente 30 milhões, em 2010, para cerca de 31 milhões, em 2022, passando de 52% para 52,3% - mais da metade - dos habitantes do Nordeste.

Numa perspectiva dinâmica, equipe da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) liderada pelo Professor Járvis Campos, coordenador do Comitê de Projeções e Estimativas Demográficas da Associação Brasileira de Estudos Populacionais (Abep), lembra velhas questões que se mantinham no cenário do Semiárido entre os Censos do IBGE de 2010 e 2022 (Madeiro, 2023):

> *Dos 1.262 municípios no Semiárido, 644 (51%) perderam população nesses 12 anos. É uma porcentagem maior do que a média nacional, já que 43% dos municípios (2.399) encolheram em população desde 2010. Por outro lado, 606 cidades no Semiárido tiveram crescimento (48%) [...]. No Semiárido estão 90% das cidades com maior percentual de casas vazias de forma permanente: são 17 no Nordeste e a outra é Nova Belém (MG). Só não estão no Semiárido Campos Verdes (GO) e Arco-Íris (SP).*

Do ponto de vista econômico, dados de Produto Interno Bruto (PIB) a preços de 2010 para o período 2002-2021 apontam que o Semiárido teria crescido algo como 3,0 % ao ano (a.a.), sendo 4,3% a.a. entre 2002 e 2014 e meros 0,8% a.a. entre 2014 e 2021 - taxas expressivas, sobretudo no primeiro intervalo -. O Nordeste cresceu nesse mesmo período cerca de 2,6% a.a., sendo 3,7% a.a. entre 2002-2014 e 0,7% a.a. entre 2014-2021. O País teria crescido entre 2002-2021 apenas 2,11% a.a., sendo 3,48% a.a. no primeiro intervalo e com registro de -0,19% a.a. – valor negativo - entre 2014-2021, segundo dados da mesma fonte. Em outras palavras, o Semiárido avançou mais.[9]

O cenário recente da evolução do Semiárido, do ponto de vista socioeconômico, foi positivo, pois tanto os indicadores econômicos como os sociais apresentaram tendências favoráveis. Isso anima a pensar possíveis transformações para a região. Para se avançar mais e potencializar essa trajetória, evitando alguns dos subprodutos indesejados - degradação ambiental, exclusão social, etc. -, parece indispensável a utilização de uma ferramenta que permita atuar com o tecido sociopolítico regional, provocando atitudes que protagonizem a ação coletiva na base dos territórios e estimulando posturas favoráveis à inovação e ao desenvolvimento. A ideia se volta para potencializar os resultados na direção desejada do desenvolvimento sustentável, o que envolveria, é claro, preocupação explícita com a inclusão social e a sustentabilidade ambiental, o enfrentamento das mudanças climáticas e a formação de espaços de articulação comunitária e de promoção do comum, no sentido empregado por Dardot e Laval (2017).[10] Na minha opinião,

9 Dados do Ipeadata, Contas regionais (acesso em 11/08/25). Ver, também, Cavalcanti Jr. e Lima (2025) para uma análise da dinâmica econômica do Semiárido e da sua indústria no período 1999/2001 a 2011/2013.

10 Esses autores concebem o comum como arena de luta política contra o capitalismo, ao impedir que determinados espaços da sociabilidade e economia sejam subordinados à lógica da acumulação e do lucro privado. Potencializar espaços comuns, coletivos ou comunitários constituiria a vanguarda da luta "[...] por um futuro possível para além do neoliberalismo"; sendo "[...] a única chave para um futuro livre do capitalismo" (Dardot e Laval, 2017, p. 200). Ver também Maia (2024).

a ferramenta para isso é o planejamento territorial[11]. E, adianto aqui, duas inovações processuais/organizacionais associadas ao planejamento territorial – planos articulados e programas territoriais – que poderiam se coligar com outras inovações, em curso e emergentes, na região, amparando trajetória convergente do Semiárido com o desenvolvimento sustentável.

3. Planejamento territorial como inovação e fator de mudança[12]

O planejamento é ferramenta indispensável no apoio à construção de rumos futuros e, consequentemente, para dar lastro à realização de desejos da população. É, também, uma ferramenta para racionalizar ações, organizar e decodificar as necessidades de recursos humanos, materiais e financeiros a mobilizar e conceber, do modo a dar consequência a projetos políticos de desenvolvimento. O planejamento, vale recordar, é sempre uma delegação de poder das estruturas sociais que comandam a política, destacando-se aí o papel relevante do Estado (Matus, 1993; Cardoso Jr., 2020).

Sem entrar no mérito das estruturas de poder[13], o Estado se constitui como o grande fiador do arcabouço de planejamento, tenha este a forma que assumir. Não há substituto para o papel que o Estado pode desempenhar no desenvolvimento, posto que quanto mais desigual a sociedade tanto mais desejável será a mediação de um ente que possa se contrapor à força dos detentores usuais do poder econômico e político. Não resolve os conflitos sociais e as contendas políticas, mas pode encaminhar sua superação e ajudar na arbitragem das opções postas ao crivo das sociedades.

Penso o planejamento governamental, em sentido amplo, como ferramenta essencial à democracia e à cidadania. Mas, percebam, este só pode realizar-se plenamente, nesse sentido, com a incorporação de uma dimensão territorial explícita. O território abre a perspectiva de um diálogo 'dialético' de cima para baixo e de baixo para cima entre as forças vivas da sociedade. Um planejamento autoritário – como vimos muitas vezes – não percorre esse circuito de mão dupla, essencial para que o planejamento se entranhe na sociedade. Enquanto elemento basilar do processo de planejamento e não meramente referência para suas ações, o território representa uma nova dimensão processual, integrando instâncias de governo, classes e grupos sociais relevantes da população, que se engajam, ativa e democraticamente, nos debates, para discussão, formação de consensos e tomada de decisões acerca das melhores iniciativas a promover.

11 A maior tentativa de se instaurar o planejamento territorial no Brasil pode ser encontrada em Brasil (2008).

12 O tópico toma por base Galvão (2023 e 2025b), que exploram a temática em maior profundidade, decompõem as características do sistema de programação-orçamentação do processo constituinte de 1988 e sugerem mudanças.

13 Há uma literatura clássica nisso: Ver Poulantzas e Miliband (1975), Matus (1993), Evans (1996) e Jessop (1994).

De um planejamento "duro" e economicista que prevaleceu no pós-guerra, onde o Estado tinha uma ascendência quase total, caminhamos para outro na globalização, mais holístico, difuso na implementação e atento ao conjunto de problemas com que se defrontam as sociedades.[14] Nosso planejamento em tempos de neoliberalismo involuiu para um sistema de programação e orçamentação[15], que nos impeliu ao curto prazo e às castrações financeiras, impedindo o exercício de elaborar os sonhos. Sachs (2014, p. 71 a 73) é preciso quanto a isso:

> *[...] o Brasil precisa com urgência reaprender a planejar e a se dotar de instituições apropriadas, tanto em nível federal quanto em nível regional.*
>
> *A contra-reforma liberal, baseada na teologia do mercado, se esforçou durante os últimos trinta anos a solapar o conceito de planejamento na sua ambição legítima de organizar o debate societal sobre o projeto nacional a longo prazo e as estratégias necessárias para realizá-lo. Os órgãos de planejamento passaram a elaborar e administrar o orçamento, função indispensável, porém, que não substitui ao planejamento propriamente dito. [...]*
>
> *Devemos sair do curto-prazismo, tão ao gosto dos políticos que sempre estão se preparando para a próxima eleição, evitando ao mesmo tempo a armadilha de um planejamento autoritário e burocrático, sem espaço para o diálogo entre os protagonistas do processo de desenvolvimento com vista a soluções negociadas.*

O planejamento territorial estrutura uma alternativa ao arcabouço vigente, integrando esforços de instâncias de governo e segmentos sociais relevantes na montagem de um todo coerente, elaborado de forma participativa, com ascendência e protagonismo da base social dos territórios na organização das iniciativas compatíveis com essa escala. Aqui, duas mudanças, reclamadas ao planejamento territorial nacional, que importam ao momento do Semiárido:

1. desenhar as conexões necessárias entre os planos nacionais, regionais e setoriais, preenchendo as lacunas dos que não existem hoje, bem como definindo seu encaixe à estrutura atual de programação-orçamentação, para constituir um novo rito de planejamento, cujos nexos se expressem na participação social ampla e no princípio da subsidiariedade[16], que favorece escalas menores de atuação;

14 Na transição dessas eras, o planejamento perdeu prestígio político, visto atrapalhar as orientações neoliberais favoráveis a uma reprodução sem amarras dos grandes capitais. Myrdal (1962), amparado no sucesso da social-democracia sueca, representa bem a crença no planejamento do pós-guerra. E autores como Furtado (1974); Evans (1996) e Harvey (2024), dentre outros, assinalam como na globalização, com os fluxos de capitais livres e o câmbio sujeito às flutuações do mercado, foi imposta perda de graus de liberdade sem precedente aos Estados nacionais.

15 É necessário restabelecer a hierarquia usual do planejamento: planos – programas – orçamentos – execução.

16 O princípio da subsidiariedade na política regional europeia indica que a União só pode intervir em áreas que não são da sua competência exclusiva quando a ação em seu nível é mais eficaz que a ação nacional, regional ou local. Decisões devem ser tomadas, sempre que possível, no nível mais próximo do cidadão. Galvão (2004, p.130).

2. conceber programas territoriais que articulem as iniciativas em curso e acrescentem novas, integrando agendas relevantes de ações em escala sub-regional – metropolitanas, meso/microrregionais –, em favor de habilitar um conveniamento entre instâncias de governo e forças sociais, conformando uma coalizão política para o desenvolvimento.

Ambos os pontos transcendem a região Semiárida e cobram uma mudança que só pode e deve ser produzida em âmbito nacional, com jurisdição sobre o conjunto integral dos territórios sub-regionais.[17] Um arcabouço sistêmico de planejamento territorial que articule múltiplas escalas e envolva de forma direta governos e populações pode assumir uma conformação que contemple vários dos planos que já existem e sugerir criar outros ainda inexistentes na prática.

Ao recuperar o espaço dos planos (nacionais, regionais, setoriais e de ordenamento territorial), articulá-los à estrutura constitucional de programação-orçamentação (que deve ser mantida) e torná-los peças efetivas de um sistema (que associa planos, programas, projetos e atividades), institui-se o arcabouço efetivo de planejamento territorial para o desenvolvimento (Quadro 1).

Os objetos do planejamento são as políticas públicas e os custeios e investimentos associados. Aqui, uma outra forma de conceber as ações, com base em programas territoriais holísticos, articula as compatíveis com o âmbito territorial, submetendo-as ao crivo dos atores, organizados em seus fóruns ou conselhos colegiados (inclui representações da União, dos estados, do DF e dos municípios, além de absorver contribuições de especialistas convidados).

Quadro 1. Esquema básico do arcabouço de planejamento/coordenação territorial

Tempo / Prazo **Espaço/Âmbito**	**Horizonte** 12 a 15 Anos	**Horizonte** 8 a 10 Anos	**Horizonte** 4 a 5 Anos	**Horizonte** 4 anos
	Planos	**Planos**	**Planos**	**Programas**
Nacional	✸ Plano Estratégico Longo Prazo	✸ Plano Nacional de Ordenamento Territorial	✸ Plano Nacional de Desenvolvimento	✦ Plano Plurianual (PPA)
Regional	?	✦ Planos Estratégicos Macrorregionais		-
Estadual	?	-	✸ Planos Estaduais de Desenvolvimento	✦ Planos Plurianual (PPA)
Sub-regional	?	?	✸ Planos Sub-regionais Desenvolvimento	-
Municipal	-	✦ Plano Diretores Municipais	✦ Planos Diretores Municipais (revisão)	✦ Planos Plurianual (PPA)

✦ Já existem
✸ Por fazer

Planos setoriais compatilizados ao sistema de planejamento. Por exemplo, Plano Clima (até 2035) articulado com o Plano Estratégico de Longo Prazo e Plano Nacional de Ordenamento Territorial, além de organicamente refletido no Plano Regional de Desenvolvimento do Nordeste.

Fonte: baseado em Galvão (2023 e 2025b).

17 Não basta uma única sub-região ou região abarcar um projeto político dessa envergadura, pois o ganho efetivo será menor do que se todo o conjunto territorial o adotar. Sachs (2014, p. 73) nos ajuda, de novo: "[...] a soma dos projetos locais não pode substituir a um plano de desenvolvimento nacional".

Dessa maneira, caberia conceber um robusto programa territorial que fosse capilar, de gestão federativa compartilhada, e promovesse o deslanche de agendas de ações voltadas ao local, ao municipal, ao sub-regional e mesmo ao regional e nacional (quando pertinentes), cujas decisões emanassem do núcleo de coordenação na base dos territórios, dos fóruns ou conselhos deliberativos correspondentes. Para isso, tais instâncias deveriam contar com recursos compatíveis.

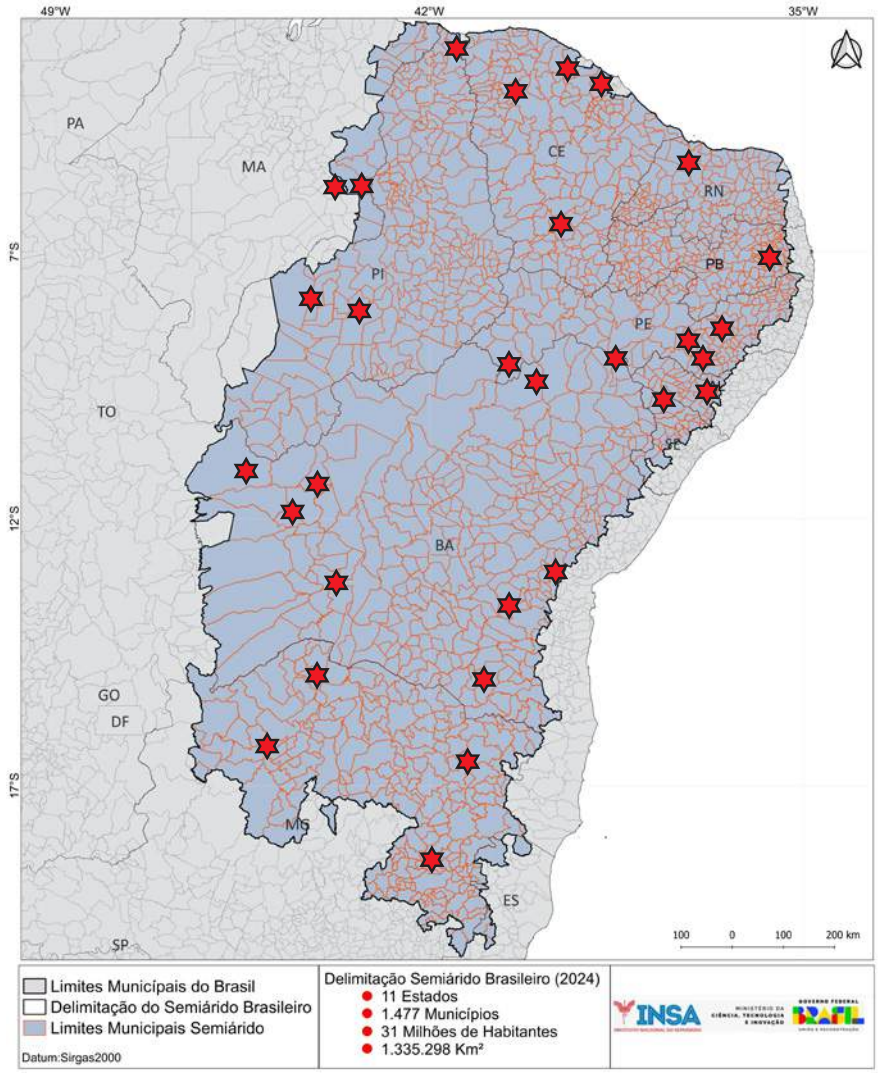
4. A trilha das inovações como vetor de mudança

Como nosso aparato de planejamento territorial inovador incidiria sobre o Semiárido atual? A distribuição espacial dos 30 maiores municípios do Semiárido, em termos de PIB a preços de mercado, reitera um ativo recente importante a ser explorado: ao contrário de poucos anos atrás, o Semiárido possui, na atualidade, uma malha de cidades de dimensão econômica significativa espalhada por seu território, apta a amparar núcleos de coordenação e gestão dos programas territoriais sugeridos (Mapa 3). Além desses, outros municípios menores revelam crescimentos elevados nos últimos anos, indicando que essa malha tem tendência de adensamento futuro. Muitos são ligados ao agronegócio de grãos, à fruticultura, à mineração e aos serviços (portos e turismo), mas também à agricultura familiar e às energias renováveis. É de se esperar, portanto, melhores condições para a estruturação de bases necessárias a uma atuação mais desenvolta dos diversos atores, em prol do desenvolvimento sustentável da região.

Os 30 municípios que apresentaram maiores PIB, a preços de 2010, no Semiárido são, pela ordem: 1) Teresina (PI) (R$ 11,5 bilhões em 2021 - única capital de Estado); 2) Feira de Santana (BA) (R$ 8,1 bilhões); 3) Montes Claros (MG) (5 bi); 4) Caucaia (CE) (4,9 bi); 5) Campina Grande (PB) (4,8 bi); 6) Caruaru (PE) (4,0 bi); 7) São Gonçalo do Amarante (CE) (4,0 bi); 8) Vitória da Conquista (BA) (3,8 bi); 9) Mossoró (RN) (3,8 bi); 10) Petrolina (PE) (3,7 bi); 11) Governador Valadares (MG) (3,4 bi); 12) Barreiras (BA) (3,3 bi); 13) Arapiraca (AL) (2,8 bi); 14) São Desidério (BA) (2,7 bi); 15) Sobral (CE) (2,5 bi); 16) Juazeiro (BA) (2,4 bi); 17) Juazeiro do Norte (CE) (2,4 bi); 18) Formosa do Rio Preto (BA) (2,2 bi); 19) Vitória de Santo Antão (PE) (2,1 bi); 20) Paulo Afonso (BA) (1,9 bi); 21) Correntina (BA) (1,5 bi); 22) Jequié (BA) (1,5 bi); 23) Garanhuns (PE) (1,4 bi); 24) Parnaíba (PI) (1,4 bi); 25) Teófilo Otoni (MG) (1,4 bi); 26) Canindé do São Francisco (SE) (1,4 bi); 27) Pirapora (MG) (1,3 bi); 28) Uruçuí (PI) (1,3 bi); 29) Belo Jardim (PE) (1,3 bi); e 30) Timon (MA) (1,1 bi).

Apenas 3 dos 30 maiores em PIB estão também entre os que aparecem na lista das 30 maiores taxas de crescimento entre 2002 e 2021: a) São Gonçalo do Amarante (CE), com impressionantes 19,2% a.a., por sua posição estratégica perante o Porto de Pecém; b) Uruçuí (PI), com elevados 12,3% a.a., pela pujança do agronegócio - a cidade localiza-se num entroncamento fluvial importante entre os rios Parnaíba e Balsas; e c) Formosa do Rio Preto (BA), com 10,6% a.a., também pelo

agronegócio de grãos e pela pecuária. Há outras taxas, do mesmo modo, muito elevadas, em municípios de menor expressão e que, em grande parte, estão situados no Piauí (agronegócio), na Bahia (agronegócio e culturas familiares) e no Rio Grande do Norte (fruticultura, turismo e mineração). Contradições à parte, pois foi justamente pela dinâmica do agronegócio que emergiram novas centralidades urbanas na parte ocidental da região.



Mapa 3. 30 cidades (municípios) com maiores PIB no Semiárido 2021

Fonte: Ipeadata, c/ dados de IBGE; PIB municipais a preços de mercado, valores em R$ de 2010. (Ipeadata, 2010). Representação dos municípios aplicada sob imagem do Insa (2024)

Nas 30 maiores cidades em PIB, sejam tradicionais ou emergentes, que tiveram ou têm dinâmica econômica, tende a haver, em princípio, instituições, atividades comunitárias, organizações, ou seja, ativos sociais variados, que abrem possibilidades para se organizar iniciativas como a dos programas territoriais.[18].

Ainda que os elementos dinâmicos a operar em certas unidades territoriais tendam a ser mais tradicionais, muitos impostos de cima para baixo às populações e poucos relacionados a perspectivas de mudança, há que se buscar inverter a atitude dos vários atores em direção a posturas inovadoras e criativas, não só absorvendo inovações de fora em tempo de mudança de paradigma (Perez, 2002), mas também exercitando a capacidade autóctone de gerar inovações apropriadas ao Semiárido.

Há ensaios positivos, por exemplo, na deliberada orientação, nos últimos anos, para as energias renováveis. A região possui ativos importantes para o desenvolvimento: história, instituições, cultura, conhecimentos, organizações sociais, cidades médias com possibilidade de prover bens e serviços básicos à população, estruturas de gestão que evoluíram nos últimos anos, infraestruturas derivadas de investimentos recentes, que podem representar avanços e gerar impulsos de desenvolvimento no médio prazo.

Penso que há, pelo menos, quatro grandes blocos de inovações em curso na região[19], que podem se beneficiar de um adequado aparato de planejamento territorial e programação, que aproxime as unidades territoriais, em especial as dinâmicas, e as reoriente para que mirem os objetivos do desenvolvimento sustentável. A chave para um futuro melhor no Semiárido está em combinar práticas sustentáveis conhecidas – que precisam ainda ser melhor difundidas - na produção agrícola e agroindustrial, no manejo da terra e dos recursos hídricos, nos usos energéticos e na radicalização da oferta de serviços básicos à população, com algumas pitadas de inovações tecnológicas emergentes, sobretudo as que forem adequadas aos contornos da realidade regional. Trata-se de aprofundar temas em campos centrais, como a água, o bioma e a energia, escrutinando os principais desafios socioeconômicos, ambientais e de ciência e tecnologia, que apresentem potencial para impulsionar o desenvolvimento sustentável.

O primeiro bloco de inovações situa-se no terreno clássico do desenvolvimento regional brasileiro e do Semiárido, cujo núcleo reside, em particular, na questão da água, da infraestrutura hídrica e da gestão dos solos regionais.[20] Como assinalado pelo professor Macêdo (2002, ps. 41 a 45), o

18 Há ações que não dialogam com os territórios; há aquelas cuja *rationale* não se adequa a decisões sub-regionais ou locais. Cabe resguardar espaços para a tomada de decisão centralizada, cuja lógica não se coaduna com esse âmbito. As ações de defesa nacional ou relações exteriores transcendem o interesse imediato desses territórios.

19 Evito denominá-las de revoluções, pois não cumpriram seus possíveis desígnios como vetores de transformação.

20 O último *Global Sustainable Development Report 2025* registra que vários indicadores dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) se encontram em franca regressão no mundo, dentre eles o de "acesso à água de qualidade" (UN, 2025).

futuro da região é dependente de uma gestão eficiente dos recursos hídricos e dos solos, o que passa por adutoras, canais e pela válvula de segurança de projetos de interligação das bacias, o mais importante, já concluído, o que liga a do São Francisco às do Nordeste Oriental, além da conservação e reconstrução dos solos.[21] Investimentos expressivos recentes foram e estão sendo feitos na construção de adutoras, canais e barragens, o que permite o melhor enfrentamento da evapotranspiração, a raiz básica do fenômeno secas.[22]

A malha de distribuição da água, mesmo que subordinada às determinações do tecido sociopolítico regional, habilita pensar em contrapartidas, como a cobrança de um uso mais eficiente, com técnicas modernas, de menor desperdício do recurso. Ainda há questões em aberto, sobretudo quanto à natureza da gestão dos sistemas, mas a infraestrutura construída abre a possibilidade de se conectar as manchas de solo de melhor qualidade em busca de uma agricultura sustentável diversificada[23], que faz uso de tecnologias como culturas de cobertura (*cover crops*), rotação diversificada e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), sensores de umidade e irrigação subterrânea, que reduzem perdas por evaporação, ou, ainda, de gotejamento, na irrigação. Nesse campo, a luta contra o desmatamento e a favor do reflorestamento da Caatinga e da reconstrução dos solos, evitando a erosão e a perda de matéria orgânica, deve avançar concomitantemente.[24]

As mudanças climáticas exigem: uma transformação que eleve a capacidade de resistência das pessoas, atividades e ecossistemas às crises e desastres naturais como as secas e enchentes; iniciativas quanto à formação de recursos humanos (capacidades) e ampliação da rede de coleta de dados (infraestrutura); e avanços nas ferramentas de modelagem complexa dos sistemas climatológicos e hidrológicos, seja na incorporação e integração das dimensões antrópica e biológica, seja no desenvolvimento de novos indicadores conexos, como, por exemplo, índices de aridez e desertificação para orientar usos alternativos dos solos.

Um segundo bloco, bem conhecido na atualidade, é o das fontes renováveis de energia, para o qual a região é bem-dotada; um tema que importa muito ao desafio da transição para uma economia de baixo carbono. A demanda de energia, que tende a crescer exponencialmente, deve vir a constituir um entrave ao desenvolvimento de muitas regiões. Ao que tudo indica, porém, o

21 "Enquanto o açude é uma reserva estática, o canal é uma reserva dinâmica" (Macêdo, 2002, p. 44).

22 No Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) do governo federal, são previstos recursos expressivos (R$ 10,8 bilhões).

23 Os antecedentes podem ser divisados na fruticultura irrigada ao redor do polo de Petrolina-Juazeiro.

24 Macêdo (2002, p. 42) assinala: "[...] a água reservada em boqueirões rochosos é pontualmente localizada na proximidade de áreas improdutivas. A estrada, por sua vez, é implantada na cumieira do terreno [...], atravessando basicamente complexos geológicos residuais rasos e erodidos, sem a mínima vocação para a agricultura. [...] Enquanto no Centro-Sul o cultivo nobre cresce na margem da estrada, essa mesma paisagem não se vê no sertão cearense". Uma visão otimista está em *Brazilian Coalition on Climate, Forests and Agriculture*, s/d). Pode-se pensar em programas para o Semiárido como os afiançados pela UNCCD para o Sahel africano (*Great Green Wall*) ou para as colinas de Aravalli indiano (*Great Wall*)?

Nordeste e o Semiárido em particular têm amplas possibilidades de explorar seus potenciais de energia eólica, solar, da biomassa, do hidrogênio verde e mesmo outros, como as marés. [25]

Em 2024, o Nordeste foi responsável por 82,3% de toda a energia eólica e solar produzida no País, mas, ainda enfrenta desafios e gargalos na produção e distribuição.[26] Porém, até esse momento, o avanço nas energias renováveis se fez mediante a importação de equipamentos e a adaptação primária às realidades locais, atendendo a questões como a velocidade dos ventos. A expectativa, no entanto, é a de que, com o processo das mudanças climáticas, essa agilidade de apropriação das tecnologias deva se intensificar, pois a obsolescência de equipamentos na região deve se acelerar, abrindo perspectiva para retornos adicionais com a Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) autóctone.

A energia solar, cuja evolução é recente, abre lugar para que se explore a produção nativa de materiais de baixo custo para a confecção de painéis solares. A esperada elevação dos níveis de insolação e acréscimos ao potencial energético da modalidade reafirmam a tendência. O maior problema a superar, dizem os especialistas, advém da capacidade de conservação e acumulação de energia, desafio que vai de baterias à capacidade de transmissão e interligação aos sistemas.

A esse segundo bloco de inovações poderá vir a se juntar outro relacionado à logística de transportes, posto que algumas tendências, mesmo lentas, se anunciam no horizonte. É o caso da realização de investimentos ferroviários de peso, como os da Transnordestina e da Ferrovia de Integração Leste-Oeste (FIOL), que cortam a região semiárida. Ou da operação plena dos portos construídos, como Suape (PE), Pecém (CE) e Itaqui (MA), que ganham fôlego a cada ano. A malha rodoviária vai melhorando e se consolidando no Semiárido; a rede de aeroportos também.

O terceiro grande bloco de inovações é o do aparato de ciência, tecnologia e inovação, cujas atividades possuem o dom de inocular todos esses processos com a oferta de uma capacidade real de geração de conhecimentos regionais e de diálogo e apropriação de conhecimentos e inovações forâneas. O Nordeste avançou velozmente na montagem de sua rede de instituições de educação superior e de institutos federais de educação, ciência e tecnologia (Ifes), que se interiorizaram e atendem diretamente várias localidades do Semiárido, com uma capacidade de P&D que vai se tornando mais complexa e densa, por meio da interação da massa de mestres e doutores com os interesses do desenvolvimento da região.

Quando se considera que desenvolvimento e inovação estão profundamente imbricados, possuir um ativo como esse torna mais fácil avançar. As questões de pesquisa tendem a ser mais bem

25 A prospectiva (FTSG, 2025, slide 10) chama atenção para a possibilidade de que até 2050 a energia nuclear possa ser 'domesticada', tornando-se compatível com usos individuais – e locais – dentro de padrões de segurança.

26 Ver (#Colabora, 2024), a partir de dados da Abeeólica e Absolar para 2024.

delineadas; os resultados da pesquisa e desenvolvimento tendem a se tornar mais acessáveis e convergentes com a natureza real dos problemas.

O aparato deve cumprir também um papel de destaque na mobilização e organização dos atores regionais, de uma perspectiva plural, tendo por referência as experiências de alguns estados do País, como o caso dos conselhos regionais de desenvolvimento (Coredes), no Rio Grande do Sul; ou casos do próprio Nordeste, como os Territórios da Cidadania (agricultura familiar), em especial na Bahia; ou da Articulação para o Semiárido Brasileiro (ASA), que geriu programas exitosos como o "Um milhão de Cisternas", executados de forma descentralizada. Tais experiências podem servir de lastro e inspiração à montagem de programas territoriais federativos, estruturados de forma participativa, com ambição holística e visão estratégica, orientados para questões prioritárias da população e geridos com autonomia. Representariam um salto de qualidade no planejamento e nas políticas públicas regionais.

A malha de infraestrutura médico-hospitalar e as unidades regionais do complexo industrial da saúde, que se desenvolveram sobretudo nas capitais, mas se espraiaram pelas cidades médias que povoam o Semiárido, constituem nosso quarto bloco de inovações. Essa rede é importante pois se espera que o setor *serviços médicos ao homem* esteja na liderança do novo paradigma. Por mais que a revolução tecnológica esteja além das possibilidades imediatas de ação dos atores do Semiárido, absorvê-la com certa agilidade e apropriar-se mais celeremente de seus impulsos dinâmicos potenciais são objetivos importantes. A liderança desse setor emana de um processo amplo de 'convergência tecnológica', no entendimento dos especialistas (FTSG, 2025; Grinin, 2018). Para esse setor, devem convergir as contribuições destacadas da Inteligência Artificial (IA), da computação quântica, da informação, das bio e nanotecnologias, da robótica, das ciências médicas e cognitivas, conformando uma revolução que perpassará todos os setores produtivos e consuntivos da economia e sociedade.[27]

E há uma analogia possível entre os avanços nos serviços médicos e os possíveis avanços para os serviços ecossistêmicos, ambientais, climáticos e socioeconômicos. O lidar com massas brutais de informação precisa, o emprego de sensores bio e nanotecnológicos, o uso de computação avançada e a apropriação das ações de robôs, drones e outros dispositivos autogestionados, que possibilitarão ampliar muito as condições de gestão, monitoramento e avaliação em tempo real dos serviços, com ganhos nada desprezíveis às populações. A exemplo do que o Nordeste reconhecidamente já realizou no passado, ao incorporar a excelência em determinados serviços

27 No epicentro estarão sistemas "agênticos", que mudam completamente a relação dos humanos com as máquinas, pois os dispositivos e robôs serão capazes de tomar decisões e realizar tarefas autônomas, sem necessidade de programação (Grinin, 2018; FTSG, 2025). Os serviços médicos constituem campo de atenção para a elevação da qualidade de vida das populações, a partir do que alguns autores denominaram de 'inteligência viva' (FTSG, 2025), "[...] sistemas que sentem, aprendem, adaptam e evoluem" (Galvão, 2025b, p. 12).

médicos, pode-se usar de suas peculiaridades regionais para ir mais além no acompanhamento das inovações que emergem agora.

Todo esse acervo de inovações atuais e futuras não esconde o fato de que será na transformação das relações sociais que residirá o fulcro da questão do desenvolvimento do Semiárido. Como assinalei antes, "[...] é necessário avançar na construção de um arcabouço de regulação societária e ampliar os espaços da democracia, do planejamento, do reconhecimento das minorias, [...] das instituições que se reproduzem por lógicas que respeitam uma vida inclusiva, criativa e sustentável" (Galvão, 2025a). São as populações que se organizam no Semiárido que têm, de fato, o condão para encetar processos virtuosos de planejamento territorial, implementar programas territoriais e promover e orientar as transformações que interessam à maioria regional e ao planeta.

Referências

ANDRADE, M.C. de. **A terra e o homem no Nordeste.** São Paulo: Livraria Editora Ciências Humanas, 4. ed., 1980. 278 p.

ARAÚJO, T.B. A 'questão regional' e a "questão nordestina'". *In:* TAVARES, M. da C. *et al.* **Celso Furtado e o Brasil.** São Paulo: Editora da Fundação Perseu Abramo, 2000. p.71-92. Disponível em: *https://fpabramo.org.br/editora/wp-content/uploads/sites/17/2017/05/celso_furtado_e_o_brasil1.pdf*

ATLASBR. **Você sabe o que é?** Desenvolvimento Humano. 2025. Disponível em: *http://www.atlasbrasil.org.br/acervo/atlas*. Acesso em: 29 out. 2025.

BANCO DO NORDESTE DO BRASIL. **Censo Demográfico 2022**. Primeiros resultados. Fortaleza: julho 2023. Disponível em: *https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1791/3/2023_CDPR_GERAL.pdf*

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Relatório final.** Grupo de trabalho interministerial para redelimitação do Semi-Árido nordestino e do Polígono das Secas. Brasília: jan 2005. Disponível em: *http://www.cpatsa.embrapa.br/public_eletronica/downloads/OPB1839.pdf*

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Plano Estratégico de desenvolvimento sustentável do Semi-Árido.** Brasília: 2006. Disponível em: *https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/desenvolvimento-regional/pcdr/planos-de-desenvolvimento-regionais-e-estaduais/copy3_of_Plano_semi_arido_PDSA.pdf*

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente; Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas – PBMC**. 2016. Disponível em: *https://www.pbmc.coppe.ufrj.br/index.php/pt/organizacao/o-pbmc*

BRASIL. Ministério do Planejamento e Orçamento – MPOG. **Estudo da dimensão territorial do planejamento** (7 Volumes). Brasília: SPI/Ministério do Planejamento e Gestão e CGEE, 2008. Disponível em: *https://brasil2100.com.br/wp-content/uploads/2023/05/Estudo-da-Dimensao-Territorial_vol_1.pdf*

BRAZILIAN COALITION ON CLIMATE, FORESTS AND AGRICULTURE. **2030-2050 Vision:** The future of forests and agriculture in Brazil. s/d. Disponível em: *https://coalizaobr.com.br/wp-content/uploads/2023/05/2030-2050-The-Future-of-Forests-and-Agriculture-in-Brazil.pdf* Acesso em: 20 abr 2025.

BRUNO, Ernani Silva. **O Sertão, o Boi e a Sêca:** Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte. vol. II. São Paulo: Cultrix, 1959.

CANO, W. **Desconcentração produtiva regional no Brasil 1970 – 2005**. S. Paulo: Edunesp, 2007. 304 p.

CANO, W. **Desequilíbrios regionais e concentração industrial no Brasil 1930-1995.** Campinas: Edunicamp, 1998. Disponível em: *https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14495/1/Desequilibrios_regionais_concentra%C3%A7%C3%A30_industrial.pdf*

CARDOSO JR., J.C. (org.) **Planejamento governamental para céticos: evidências históricas e teóricas no Brasil.** S. Paulo: Ed. Quanta, 2020. Disponível em: *https://www.ufrgs.br/cegov/files/pub_141.pdf*

CARVALHO, O. *et al.* **Variabilidade climática e planejamento da ação governamental no Nordeste semi-árido** - avaliação da seca de 1993**.** Brasília: SEPLAN-PR/IICA, 1994. xerox, 201 p.

CAVALCANTI JR, Carlos Antonio Araujo; LIMA, João Policarpo Rodrigues. Desempenho e mudanças da economia do nordeste nas primeiras décadas do século. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 56, n. 1, p. 160–179, 2025. DOI: 10.61673/ren.2025.1607. Disponível em: *https://www.bnb.gov.br/revista/ren/article/view/1607.* Acesso em: 17 out. 2025.

#COLABORA. **Falta de infraestrutura atrasa a transição energética no Nordeste.** 2024. Disponível em: *https://projetocolabora.com.br/ods7/energia-falta-de-infraestrutura-atrasa-transicao-no-nordeste/* Acesso em: 19 ago 25.

CUNHA, E. da. **Os sertões.** Campanha de Canudos. Rio de Janeiro: Livraria Francisco Alves, 20ª edição corrigida, 1946. 646 p.

DARDOT, P.; LAVAL, C. Comum: ensaio sobre a revolução no século XXI. **Lugar Comum, estudos de mídia, cultura e democracia,** v.49, 2017. Disponível em: *https://revistas.ufrj.br/index.php/lc/article/view/49475/26997*

DINIZ, C.C. Desenvolvimento poligonal no Brasil: nem desconcentração, nem contínua polarização. **Revista Nova Economia**, Belo Horizonte, v. 3, n. 1. p. 35-64, 1993. Disponível em: *https://www.researchgate.net/profile/Clelio-Diniz-2/publication/5200267_Desenvolvimento_poligonal_no_Brasil_nem_desconcentracao_nem_continua_polarizacao/links/54db5bb30cf261ce15cff6dc/Desenvolvimento-poligonal-no-Brasil-nem-desconcentracao-nem-continua-polarizacao.pdf?_tp=eyJjb250ZXholjp7ImZpcnNoUGFnZSI6InB1YmxpY2FoaW9uliwicGFnZSI6InB1YmxpY2FoaW9uIn19*

EVANS, P. El Estado como problema y como solución. **Desarrollo Económico**, v. 35, n. 140. Santiago: enero, 1996. Disponível em: *https://panel.inkuba.com/sites/2/archivos/8%20Peter%20Evans-%20El%20Estado%20como%20problema%20y%20como%20solucio%CC%81n.pdf*

FURTADO, C. **A fantasia desfeita.** Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1989. 206 p.

FURTADO, C. **O mito do desenvolvimento econômico.** Rio de Janeiro, Paz e Terra, 1974.

FURTADO, C. **Seca e poder.** Entrevista com Celso Furtado (entrevistadores Maria da Conceição Tavares; Manuel Correia de Andrade e Raimundo Rodrigues Pereira). São Paulo: Ed. da Fundação Perseu Abramo, 1998. Disponível em: *https://bibliotecadigital.fpabramo.org.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/246/seca_e_poder_0.pdf?sequence=1*

FUTURE TODAY STRATEGIC GROUP – FTSG. **2025 Tech Trends Report**. Apres. Chief Executive Officer, Amy Webb, realizada em 13/04/2025. Disponível em: *https://ftsg.com/wp-content/uploads/2025/03/FTSG_2025_TR_FINAL_LINKED.pdf* Acesso em: 10 mar 2025.

GALVÃO, A. **Política de desenvolvimento regional e inovação:** lições da experiência européia. Rio de Janeiro: Garamond, 2004.

GALVÃO, A. Planejamento governamental territorial: Como avançar? *In:* ROCHA, Paiva e Morais (orgs.) **Desigualdades regionais e planejamento federativo no Rio G. do Sul: da experiência acumulada às novas perspectivas** (E-book), p. 308-331. Uruguaiana: Editora Conceito, 2023. Disponível em: *https://www2.faccat.br/portal/sites/default/files/ckeditorfiles/e-book_2023_Desigualdades_Regionais_com.pdf*

GALVÃO, A. O mito desnudo e a utopia do desenvolvimento *In:* SOUSA, C. *et al.* (orgs.) **Celso Furtado e o mito do desenvolvimento econômico 50 anos depois.** Campina Grande: Eduepb, 2025a.

GALVÃO, A. **Espaço, território, ambiente e população:** estratégias para o desenvolvimento (regional) sustentável. Rio de Janeiro: Fiocruz, Saúde Amanhã, Governo Federal Brasil União e reconstrução. Textos para Discussão, n.97, 2025b.

GRININ, L. Kondratieff waves, technological modes, and the theory of productions revolutions *In:* GRININ, L.; KOROTAYEV, A. (orgs.) **Kondratieff waves: The spectrum of opinions**. Volgograd, Uichtel Publishing House, 2019. Disponível em: *https://www.sociostudies.org/upload/sociostudies.org/almanac/k_waves_4_en/005.pdf*

GRUPO DE TRABALHO PARA O DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE – GTDN. Uma política de desenvolvimento econômico para o Nordeste. *In:* VERSIANI, F.R.; MENDONÇA DE BARROS, J.R. (orgs.) **Formação econômica do Brasil:** a experiência da industrialização. São Paulo: Saraiva, 1. ed. Revista, 1978. Disponível em: *https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/17760/1/FCLiv_Uma%20Pol%c3%adtica%20de%20Desenvolvimento%20Econ%c3%b4mico%20para%200%20Nordeste_compl.pdf*

HARVEY, D. **Crônicas anticapitalistas:** Um guia para a luta de classes no século XXI. S. Paulo: Boitempo, 2024. 238 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa Nacional por amostra de domicílios contínua (IBGE/PNAD contínua).** De 2012 até 2024. 2025. Disponível em:

https://www.ipeadata.gov.br/ExibeSerieR.aspx?stub=1&serid=2096726935&MINDATA=2012&MAXDATA=2030&TNIVID=2&TPAID=1&module=S

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO – INSA. **Delimitação do semiárido brasileiro.** 2024. Disponível em: *https://www.gov.br/insa/pt-br/centrais-de-conteudo/mapas/mapas-em-pdf/delimitacao-do-semiarido-brasileiro-2024.pdf/view* Acesso em: 15 ago. 2025.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Summary for policymakers. *In:* CORE WRITING TEAM, H. Lee; J. Romero (orgs.), **Climate Change 2023:** Synthesis report. Contributions of working groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change. Genebra: 2023. Disponível em: *https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf*

IPEADATA. **Base de dados macroeconômico, regional e social.** 2010. Disponível em: *https://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx*

JESSOP, B. Changing forms and functions of the state in an era of globalization and regionalization. *In:* DELORME, R.; DOPFER, K. (orgs.). **The political economy of diversity:** evolutionary perspectives on economic order and disorder. Northampton: Edward Elgar, 1994.

MACÊDO. H. **O poço e o pomar na terra da luz.** Fortaleza: SECULT, 2002.

MADEIRO, C. **Com década seca, 90% das cidades com mais casas vazias ficam no semiárido.** Coluna e reportagem do UOL, 10/07/2023. Disponível em: *https://noticias.uol.com.br/colunas/carlos-madeiro/2023/07/10/censo-com-decada-de-seca-semiarido-perde-moradores-em-metade-das-cidades.htm?cmpid=copiaecola* Acesso em: 15 ago. 2025.

MAIA, R. **Platão e o comum.** São Paulo: Anablume, 2024. 438 p.

MATUS, C. **Política, planejamento & governo**, Tomos I e II. Brasília, Ipea 1993. Disponível em: *https://pt.scribd.com/document/285785802/Matus-Politica-Planejamento-e-Governo-Tomo-I e https://repositorio.ipea.gov.br/bitstreams/5f62a565-49d3-40b8-8ce5-01ff57618706/download*

MYRDAL, Gunnar. **O Estado do futuro**. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1962. 278 p.

OLIVEIRA. F de. **Elegia para uma Re(li)gião.** SUDENE, Nordeste, planejamento e conflito de classes. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1977. 137 p.

PEREZ, C. **Technological revolutions and financial capital:** The dynamics of bubbles and golden ages**.** Cheltenham: Edward Elgar, 2002. 224 p.

PIVETTA, M.; FONTANETTO, R. Aquecimento global faz surgir primeira zona árida e expande clima semiárido e áreas secas no Brasi. **Revista FAPESP,** São Paulo, abril 2024 Disponível em: *https://revistapesquisa.fapesp.br/aquecimento-global-faz-surgir-primeira-zona-arida-e-expande-clima-semiarido-e-areas-secas-no-brasil/* Acesso em: 5 ago. 2025.

POULANTZAS, N.; MILIBAND, R. **Debate sobre o estado capitalista**. Porto: Afrontamento, 1975.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO – PNUD. **Relatório de Desenvolvimento Humano 2025;** dados de 2023. Disponível em: *https://www.undp.org/pt/brazil/desenvolvimento-humano/painel-idhm* Acesso em: 13 ago. 2025.

SACHS, I. Amazônia: Laboratório das biocivilizações do futuro. *In:* Castro, V.; Wehrmann, M. (orgs.) **Esquina da sustentabilidade:** Um laboratório da biocivilização. Brasília, Ed. UnB, 2014. Disponível em: *https://diplomatique.org.br/amazonia-laboratorio-das-biocivilizacoes-do-futuro/*

SPINONI, J. [AP] apud JRC **World atlas of desertification**. 2015. Disponível em: *https://wad.jrc.ec.europa.eu/patternsaridity*. Acesso em 13 ago 2025.

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE - SUDENE. **Resolução do Conselho Deliberativo (Condel) nº 176, de 03/01/2024**. Aprova Relatório Conclusivo elaborado pela Equipe Técnica do Comitê Provisório do Conselho Deliberativo da SUDENE (CONDEL/SUDENE), instituído pela Resolução CONDEL/SUDENE nº 155, de 29 de abril de 2022, sobre as irresignações apresentadas por Entes federativos subnacionais contra a exclusão de municípios do Semiárido brasileiro e dá outras providências. Disponível em: *https://www.gov.br/sudene/pt-br/acesso-a-informacao/legislacao/hierarquia/resolucoes-conselho-deliberativo/resolucao-condel-sudene-no-176-de-3-de-janeiro-de-2024*

TAVARES M.C. (org.) **Celso Furtado e o Brasil.** São Paulo: Ed. Da Fundação Perseu Abramo, 2000. Disponível em: *https://fpabramo.org.br/editora/wp-content/uploads/sites/17/2017/05/celso_furtado_e_o_brasil1.pdf*

THEODORO, M. **A sociedade desigual:** racismo e branquitude na formação do Brasil. Rio de Janeiro: Zahar, 2022. Disponível em: *https://www.jur.puc-rio.br/wp-content/uploads/2022/08/THEODORO-Mario-A-sociedade-desigual.pdf*

UNITED NATIONS – UN. **Global sustainable development report 2025.** Financing sustainable development to 2030 and mid-century. N. York: 2025. Disponível em: *https://s3.amazonaws.com/sustainabledevelopment.report/2025/ sustainable-development-report-2025.pdf*

UNITED NATIONS CONVENTION TO COMBAT DESERTIFICATION – UNCCD. **The Global threat of drying lands:** Regional and global aridity trends and future projections. Science Policy Brief, s/d. Disponível em: *https://www.unccd.int/sites/default/files/2024-12/aridity_brief.pdf* Acesso em: 13 ago. 2025.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP. **Navigating new horizons.** A global foresight report on planetary health and human wellbeing. Nairobi: 2024. 108 p. Disponível em: *https://council.science/wp-content/uploads/2024/07/Global-Foresight-Report-2024-FINAL.pdf*

UNIVERSITY OF EAST ANGLIA CLIMATIC RESEARCH - UNIT; Jones, P.D.; Harris, I.C. CRU TS3.20: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 3.20 of **High resolution gridded data of month-**

by-month variation in climate (Jan. 1901 - Dec. 2011). NCAS British Atmospheric Data Centre, *date of citation*. 2013. Disponível em: *https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/2949a8a25b375c9e323c53f6b6cb2a3a*

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL. **Laboratório de análise e processamento de imagens de satélites (Lapis).** 2024. Disponível em: *https://www.letrasambientais.org.br/posts/semiarido-brasileiro-tem-nova-delimitacao-desde-janeiro-de-2024#:~* Acesso em: 15 ago. 2025.

O papel da inteligência artificial no avanço da previsão de extremos de tempo e clima: Sistema Inteligente de Previsão de Extremos Climáticos

Paulo Nobre [1], *Alessandra Cristina Corsi*[2], *Marcel Rodrigues de Barros*[3], *Francisco José Lopes de Lima*[4], *Thalyta Soares dos Santos*[5], *Werner Conrado Jacob Denzin*[6], *Felipe Pacheco de Almeida Euphrásio*[7], *Jorge Luis Gomes*[8], *Aline Fernandes Heleno*[9], *Wanderley Oliveira Mendes*[10], *Thierry Pinheiro Moreira*[11], *Fábio José Muneratti Ortega*[12], *Diogo Nunes da Silva Ramos*[13], *Leonardo B. L. Santos*[14], *Allan Rodrigues Silva*[15], *Felipe Silva Silles*[16], *Denis Bruno Viríssimo*[17], *André Brasil Vieira*[18]

Resumo

Diante do crescimento exponencial na frequência e intensidade de extremos climáticos em todos os continentes, crescimento este decorrente do

Abstract

Given the exponential growth in the frequency and intensity of extreme weather events on all continents, a growth due to global

1 PhD, climatologista, cientista sênior. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe).
2 Geóloga, pesquisadora. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).
3 Engenheiro de computação, pós-doutorando em Aprendizado de Máquina pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).
4 PhD, meteorologista, pesquisador. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial/Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia (Senai Cimatec).
5 Doutora, meteorologista, pesquisadora. Senai Cimatec.
6 Bacharel em Ciência da Computação, consultor técnico de *software*, SiDi.
7 Engenheiro de Controle e Automação, bolsista. IPT.
8 Doutor em Meteorologia. Inpe.
9 Pesquisadora. IPT.
10 Analista de sistemas. Consultor de TI – Programa Sipec.
11 PhD, visão computacional, consultor técnico. SiDi.
12 Engenheiro de Computação, pós-doutorando em Aprendizado de Máquina. Centro de Investigação em Agricultura Avançada e Mudanças Climáticas (Ciaam) da USP.
13 PhD, meteorologista, pesquisador, Senai Cimatec.
14 Pesquisador titular. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden).
15 Doutor, meteorologista, pesquisador. Senai Cimatec.
16 Engenheiro de *Software*, pesquisador. IPT.
17 Engenheiro de *Software*, pesquisador. IPT.
18 Doutor em Ciência da Computação, pós-doutorados em Simulação Molecular (*Drug Discovery*), Biometria e Genética de Plantas, pesquisador. Senai Cimatec.

aquecimento global resultante do acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera, faz-se mister desenvolver a capacidade de previsão de tais extremos climáticos com maior antecedência e acurácia. Este artigo posiciona o estado da arte na capacidade prognóstica de anomalias climáticas com até um ano de antecedência pelo Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM) e sugere caminhos de aprimoramento de tal capacidade por meio de técnicas de inteligência artificial.

Palavras-chave: Clima. Extremos climáticos. Inteligência artificial aplicada à previsão climática. Crise ambiental. Impactos ambientais. Modelagem acoplada oceano-atmosfera. Ciência e tecnologia. Previsão sazonal.

warming resulting from the accumulation of greenhouse gases in the atmosphere, it is essential to develop the ability to predict such extreme weather and climate events with greater advance and accuracy. This article presents the state of the art in the ability to predict climate anomalies with earth system models up to one year in advance and suggests ways to improve this ability through Artificial Intelligence techniques.

Keywords: *Climate. Extreme climate. Artificial intelligence applied to climate prediction. Environmental crisis. Environmental impacts. Ocean-atmosphere coupled model. Science and technology. Seasonal forecast.*

1. Introdução

Diante do gradual, porém persistente, aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera global – que em 2024 ultrapassou a marca histórica de 420 ppmv, acompanhado do aumento das temperaturas da superfície dos oceanos, observado globalmente desde o início do século passado e que, em 2023, apresentou aumento médio global inédito e diante do aumento na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos sem precedentes no Brasil e no mundo –, torna-se premente o desenvolvimento de metodologias capazes de prever tais fenômenos com maior antecedência e acurácia.

As técnicas de inteligência artificial (IA) [do Inglês, *artificial intelligence*], que vêm avançando rapidamente mundialmente, aliadas aos modelos clássicos de previsão do tempo e do clima, representam uma abordagem promissora que merece ser investigada com profundidade (Lam *et al.*, 2023). O desafio em aumentar a antecedência com a qual extremos climáticos são previstos reveste-se de especial importância nesse momento de crescimento exponencial de eventos climáticos extremos. Tal desafio é confrontado aqui pela combinação de técnicas de IA e modelagem numérica do sistema terrestre.

A precipitação é uma variável crítica para diversos setores econômicos e da sociedade em geral, mas, ao mesmo tempo, uma das mais complexas de serem previstas em modelos de circulação geral da

atmosfera (GCM) [do Inglês, *global circulation model*]. Tais modelos, como o BESM, possuem erros sistemáticos em suas previsões que precisam ser ajustados. Para mitigar esse desafio, abordagens de correção de viés foram desenvolvidas – desde técnicas estatísticas clássicas (Maraun; Widmann, 2018) até algoritmos de IA (Chantry *et al.*, 2021). Recentes avanços em modelos generativos para problemas de aprendizado profundo têm demonstrado progressos promissores. Entre estes, os modelos probabilísticos de difusão com modelos probabilísticos de difusão para redução de ruído (DDPM), [do Inglês *denoising diffusion probabilistic models*] (Ho *et al.*, 2020) demonstraram desempenho notável na geração de dados complexos em ciências atmosféricas (Price *et al.*, 2025; Li *et al.*, 2024; Mardani *et al.*, 2025). Entretanto, pesquisas específicas para o pós-processamento e a correção de viés de GCM permanecem praticamente inexploradas.

Eventos climáticos extremos que geram chuvas intensas podem deflagrar diversos processos, como escorregamentos e inundações, com graves consequências nas cidades e com impactos sociais, ambientais e econômicos.

O evento ocorrido em São Sebastião/SP, em fevereiro de 2023, foi marcado por precipitação intensa, com mais de 600 mm concentradas em menos de 24 horas (a pluviometria climatológica da região é de 300 mm/mês). As chuvas intensas provocaram diversos escorregamentos, resultando em 65 mortes (Marengo *et al.*, 2024). É importante destacar que levantamentos realizados em 2018 mostraram que o município possui 21 áreas com mais de 6.000 residências expostas a movimentos de massa e inundações (IPT, 2018). Outros eventos extremos climáticos recentes de magnitudes semelhantes, embora com dinâmicas distintas, foram registrados também em Santos e no Guarujá, em 2020, e na região metropolitana de Porto Alegre em 2024 (Valle *et al.*, 2022; Mantovani *et al.*, 2025).

Técnicas de IA demonstram notável capacidade de assimilação e processamento em tempo real de volumosos conjuntos de dados heterogêneos relacionados a eventos extremos, tais como dados meteorológicos, hidrológicos e urbanos (Materia *et al.*, 2023). Ao integrar fontes multifacetadas, como sensores ambientais, imagens de satélite multiespectrais, dados de estações meteorológicas e conteúdos derivados de plataformas digitais e redes sociais, os sistemas inteligentes promovem a identificação de padrões anômalos indicativos de iminentes eventos extremos (Neset *et al.*, 2024).

Este artigo descreve sinergias entre as técnicas de modelagem climática global a partir da integração numérica das equações de Navier-Stokes e das técnicas de IA desenvolvidas por grupos de *experts* no Brasil. Destarte, o artigo representa a primeira publicação conjunta, fruto da cooperação científica no âmbito do programa Sistema Inteligente para Previsão de Extremos Climáticos (Sipec), do Programa Brasileiro de Inteligência Artificial (PBIA). O artigo está estruturado como segue:

Primeiramente, descrevemos a evolução da previsão climática, como feito pela utilização do Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM) [do Inglês, *Brazilian Earth System Model*] vinculados ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) (Nobre *et al*., 2013). Aqui, mostramos como a representação dinâmica de processos acoplados – oceano-atmosfera-criosfera-biosfera – permite prever o sinal de anomalias da pluviometria sobre uma grande região com meses de antecedência.

Então, exploramos a possibilidade do uso da combinação de algoritmos de IA para realizar um conjunto de tarefas, tais como: i) agregação de dados em conjunto de dados espacial e temporalmente esparsos; ii) remoção de erros sistemáticos por meio de técnicas de IA; iii) redução de escala espacial utilizando técnicas de IA a partir de previsões com baixa resolução espacial; e iv) detecção de eventos extremos de tempo e clima e seus impactos sobre as cidades. Em conclusão, indicamos alguns caminhos para estudos futuros.

2. Previsão climática a partir do Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM)

O modelo BESM é o resultado do acoplamento do modelo atmosférico *Brazilian Global Atmospheric Model* (BAM) (Figueroa *et al.,* 2016) ao modelo oceânico *Modular Ocean Model version 6* (MOM6) por meio do acoplador *Flexible Modeling System* (FMS) *da National Oceanic and Atmospheric Administration/ Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (NOAA/GFDL). Integrados numericamente no tempo sobre uma grade global, representam os movimentos e as inter-relações entre a atmosfera, os oceanos, a vegetação e a cobertura de gelo. Esta seção descreve as características do modelo BESM para previsões climáticas sazonais e estudos de mudanças climáticas globais (Nobre *et al.,* 2013; 2023).

A Figura 1 mostra representações esquemáticas (a) dos passos para a inicialização acoplada oceano-atmosfera do modelo BESM e (b) sua integração no tempo via acoplador de fluxos FMS. A componente atmosférica do BESM é integrada numa grade horizontal com truncamento triangular no número de onda 62 (equivalente a ~200 Km) e 42 níveis sigma não igualmente espaçados na vertical (T062L42). A componente oceânica do BESM é integrada numa grade horizontal *lat-lon* com espaçamento uniforme de ¼ de grau e 63 níveis na vertical. As condições iniciais atmosféricas são provenientes do NOAA/*National Centers for Environment Prediction* (NCEP) [*Global Forecast System* – GFS] e oceânicas do Sistema Mercator da União Europeia. Os campos iniciais atmosféricos e oceânicos são equalizados pela integração em modo acoplado do BESM para gerar uma condição inicial para o modelo acoplado que, então, é integrado em modo prognóstico como indicado na Figura 1 (b), por 13 meses.

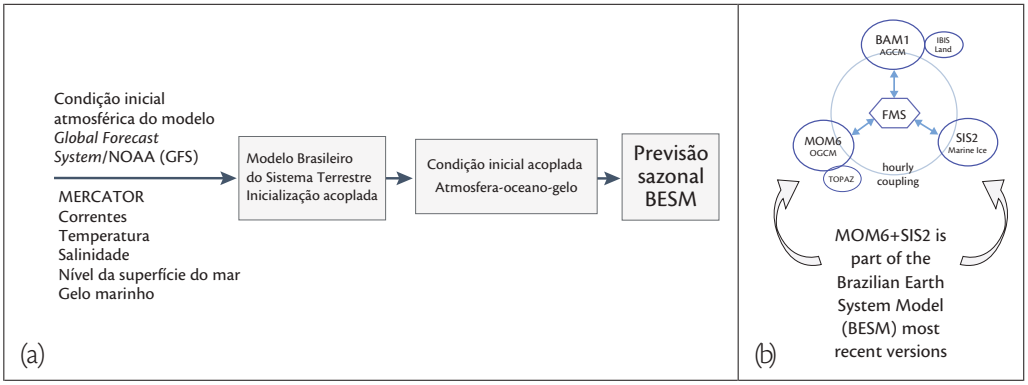


Figura 1 – Esquemático (a) da inicialização do modelo BESM (b) integração no tempo do modelo BESM

Fonte: Nobre et al. (2025, manuscrito em preparação).

A Figura 2 mostra histogramas das frequências de anomalias anuais de precipitação previstas e observadas sobre a bacia Amazônica para dois anos de contraste, 2024 (um ano de seca extrema) e 2008 (um ano de alta pluviosidade) sobre a Amazônia. É notável na Figura 2 que os sinais das anomalias – tanto negativas quanto positivas de precipitação sobre a bacia Amazônica – tenham sido previstos com um ano de antecedência, mostrando a capacidade de o modelo BESM prever desvios anuais de precipitação sobre a região. Não obstante, a previsão não captura os valores mais extremos dos eventos, isto é, a cauda das distribuições mostradas na Figura 2. Essa característica do modelo em representar as anomalias anuais de precipitação, sem contudo representar seus valores extremos está associada a diversos fatores, entre os quais: baixa resolução espacial e não resolução explícita dos processos físicos causadores da chuva, sendo esses contabilizados por meio de métodos paramétricos, entre outros.

Não obstante, tais resultados pioneiros na previsibilidade de anomalias pluviométricas regionais, com um ano de antecedência, representam um marco para a ciência de previsões de extremos climáticos. Os próximos passos na ciência de previsões de anomalias climáticas com antecedência de até um ano contemplam a utilização de técnicas complementares de IA, como exemplificadas nas seções que seguem neste artigo.

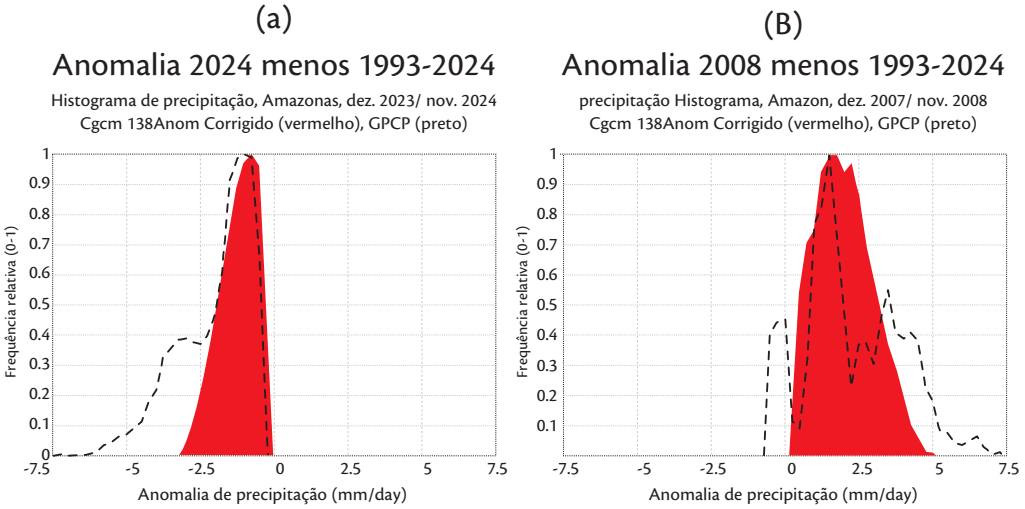


Figura 2 – Frequência relativa de anomalias anuais de precipitação média para a bacia Amazônica

Obs.: observada (linha tracejada) e prevista pelo modelo BESM com um ano de antecedência (sombreada em vermelho) para os períodos (a) para um ano de seca, de dezembro de 2023 a novembro de 2024; e (b) um ano chuvoso, de dezembro de 2007 a novembro de 2008.

Observações do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP) e previsão por conjunto do modelo BESM a partir de condições iniciais de 1-10 de novembro de 2023 e 2007, respectivamente nas figuras (a) e (b). Correção de viés por método da função de distribuição de probabilidade (PDF).

Fonte: Elaboração própria.

3. Incorporação de dados irregulares

O monitoramento por imagens capturadas por satélites artificiais revolucionou a meteorologia e a climatologia ao proporcionar uma fonte de dados com regularidade e ampla cobertura. Ainda assim, as redes de sensores em solo e no oceano continuam imprescindíveis no acompanhamento dos fenômenos naturais. A rede observacional do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) (Celaschi; Xavier Jr., 2016), fundamental à prevenção de riscos geo-hidrológicos no Brasil, assim como as redes *Tropical Atmosphere Oceans* (TAO), *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA) e *Research Moored Array for African-Asian-Australian Monsoon Analysis and Prediction* (RAMA), do *Global Tropical Moored Buoy Array Program* (Mcphaden *et al.*, 2010) para monitoramento oceânico, exemplificam a vasta gama de informações disponíveis para orientar a tomada de decisões e a rápida resposta aos riscos, com uma tendência de crescimento ainda maior.

Os desafios relacionados ao processamento de fontes de dados tão díspares são enormes. Por um lado, as técnicas clássicas para modelagem dos sistemas naturais envolvem entradas de dados tabulares – para um dado instante e um dado local, tem-se um conjunto de medições. Por outro lado, a realidade das redes de sensores é muito mais complexa. Há sensores em boias oceânicas, que variam sua posição a cada medição, sensores que falham, redes descontinuadas e taxas de amostragem distintas. Diante desse cenário, há uma demanda por algoritmos e ferramentas digitais que se adequem ao problema e tornem explícitas as premissas e limitações para uma nova geração de modelos. A inteligência artificial e o aprendizado de máquina, com sua alta capacidade de consumo de dados e forte fundamentação estatística, são os paradigmas ideais para adaptar e revigorar a ciência climatológica.

3.1. Imputação de dados faltantes no cenário climatológico

Atualmente, as previsões e o monitoramento do clima estão baseados na aplicação de modelos matemáticos dos comportamentos físicos do planeta. A aderência dos resultados obtidos por esses modelos com os fenômenos reais é garantida por um processo de assimilação de dados coletados pelas redes de sensoriamento. Assim, quando os sensores falham, ou faltam dados por outras razões, o correto funcionamento dos sistemas exige que eles sejam completados artificialmente, uma prática denominada "imputação".

Os paradigmas clássicos de imputação limitam-se a minimizar a introdução de vieses estatísticos e aberrações numéricas, como descontinuidades, predominando o uso de valores médios ou interpolados, a partir dos vizinhos próximos. Como os algoritmos de aprendizado de máquina têm a capacidade de reproduzir padrões complexos a partir de exemplos semelhantes, existe um potencial de aproximar essas estimativas dos valores verdadeiros, levando a uma maior precisão por parte dos sistemas numéricos que os utilizam.

Tal possibilidade tem sido amplamente explorada pela comunidade científica (Wang *et al.*, 2024), com concepções derivadas de todas as principais famílias de modelos de aprendizado profundo. Ressaltam-se as abordagens apoiadas em redes de grafos (Liang *et al.*, 2024; Marisca; Cini; Alippi, 2022), pela adequação ao uso de dados espaço-temporais irregulares, e também as abordagens derivadas de modelos gerativos, em especial de difusão (Hu *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2023), por capturarem a variabilidade referente às incertezas sobre os valores faltantes.

3.2. Processamento de dados irregulares e complexos

A maior parte dos modelos estatísticos, tanto baseados em equacionamento físico quanto em aprendizado de máquina, depende de garantias de regularidade das fontes de dados, como ausência de falhas temporais e grades de medições com espaçamentos regulares e previsíveis. Todavia, a

realidade do sensoriamento é bastante diferente e enfrenta diversos desafios, por exemplo falhas esporádicas e imprevisíveis, dificuldade de instrumentação em regiões remotas, entre outros.

Em resposta a esses desafios, nos últimos anos, foram desenvolvidos métodos de IA para processar essas fontes de dados irregulares. Em especial, destacam-se as redes neurais de grafo (GNN) [do Inglês, *graph neural networks*] (Scarselli *et al.*, 2009; Veličković *et al.*, 2018). Esses modelos avançados permitem relacionar quaisquer entidades no espaço e no tempo, independentemente de suas eventuais irregularidades. A Figura 3 exemplifica como as estações pluviométricas do Cemaden, que são irregularmente distribuídas, podem ser transformadas em grafo computacional que busca correlações entre os dados coletados nos diferentes locais para compor uma representação mais rica e capaz de previsões mais acuradas e robustas a eventuais falhas de sensores individuais.

Como um exemplo de sucesso recente usando modelagem baseadas em grafos, desenvolvemos um algoritmo de detecção de eventos extremos de ressaca no litoral de Santos. Esse modelo estima, com dois dias de antecedência, a altura das ondas e da maré com aderência de até 96%, enquanto os algoritmos anteriores alcançam, em média, 92% (Barros *et al.*, 2024). Essa aderência sem precedentes foi alcançada por meio da incorporação de dados irregulares medidos no canal principal do Porto de Santos, previsões de modelos numéricos clássicos e imagens de satélite. Essa "fusão de dados" multimodais e complexos é viabilizada pela flexibilidade que o mecanismo das redes neurais de grafos introduz.

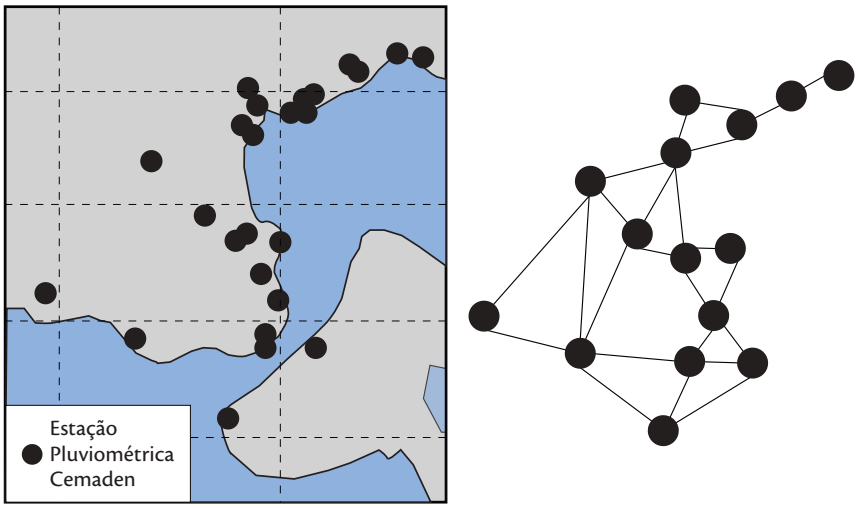


Figura 3 – Estações pluviométricas do Cemaden na região de São Sebastião e Ilha Bela, no Estado de São Paulo

Nota: As estações pluviométricas, à esquerda, podem ser modeladas como nós em um grafo computacional, à direira, e processadas por uma rede neural de grafos, viabilizando uma fusão de dados com acurácia e eficiência inéditas.

Fonte: Elaboração própria.

Outro exemplo relevante de fontes de dados irregulares são medições de variáveis oceanográficas coletadas por boias móveis que, embora forneçam medições cruciais para a modelagem dos sistemas climáticos, sofrem diversas falhas devido às condições climáticas inóspitas às quais são submetidas. Novamente, as técnicas de IA baseadas em grafos oferecem uma alternativa eficaz para incorporar os dados disponíveis sem que se precise recorrer a algoritmos complexos de pré-processamento que são suscetíveis a erros e incertezas.

Em resumo, o arcabouço crescente de fontes de dados provenientes de sensores dos mais diversos tipos oferece tanto uma oportunidade quanto um desafio para a ciência de dados. Em resposta a esses desafios, técnicas avançadas de IA foram desenvolvidas para viabilizar a integração desses dados irregulares sem necessidade de uma formulação física explícita, o que seria inviável em muitos casos.

Essas técnicas de treinamento são integradas à tarefa-fim e permitem que os modelos aprendam como utilizar essas fontes irregulares da melhor forma possível e como reagir a eventuais falhas na coleta dessas informações. Esse tipo de flexibilidade e robustez é crucial na construção de sistemas críticos que suportam a tomada de decisão em situações de desastres naturais, como no disparo de alertas antecipados para enchentes.

Portanto, o investimento no desenvolvimento e nos refinamento dessas técnicas é um pilar estratégico indispensável para mitigação de impactos de desastres no ambiente que são cada vez mais frequentes e intensos devido às mudanças climáticas. O processamento em larga escala de dados irregulares, para ações de resiliência climática, é possível, mas exige o estabelecimento de parcerias e estruturas dedicadas e munidas dos recursos necessários.

4. Correção de viés da previsão climática do modelo BESM usando modelos de difusão condicionais

Esta seção propõe o uso de modelos probabilísticos de difusão com modelos probabilísticos de DDPM condicionais na correção de viés do BESM com foco no ajuste da precipitação sobre o Sudeste brasileiro. A metodologia desenvolvida integra sequências multivariadas, *embeddings* temporais e transformações estatísticas customizadas para ajustar a distribuição da precipitação diária. A Figura 4 ilustra o fluxo do processo proposto, desde os dados de entrada do BESM e *ECMWF Reanalysis version* 5 (ERA5) até a geração da previsão corrigida por meio do modelo de difusão. Como principal contribuição, o trabalho demonstra que os DDPM podem ser adaptados com sucesso ao contexto climático, oferecendo uma nova abordagem para melhorar a acurácia de previsões e apoiar as decisões estratégicas em setores sensíveis ao clima.

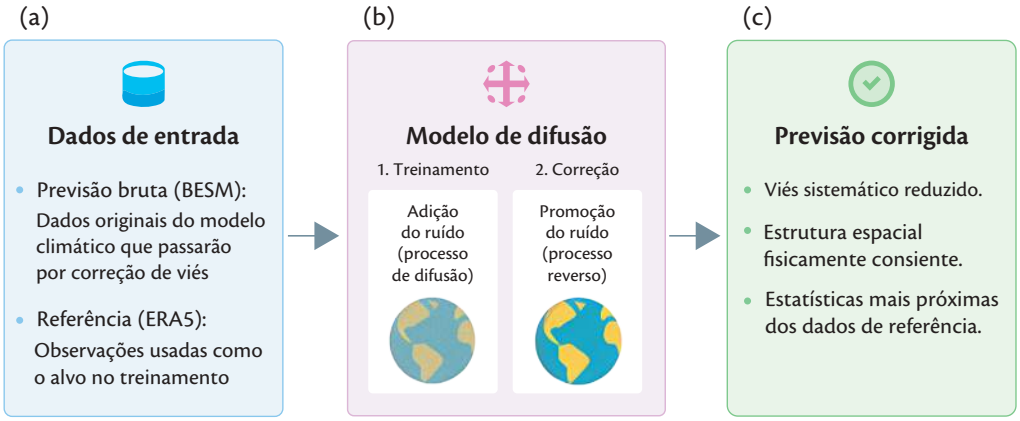


Figura 4 – Metodologia de correção de viés do BESM usando modelos de difusão

Nota: (a) Dados de entrada: previsões BESM e referência ao ERA5. (b) Modelo de difusão com processo de adição e remoção de ruído. (c) Previsão corrigida com viés reduzido.

Fonte: Elaboração própria.

4.1. Dados e métodos

O estudo utiliza duas fontes de dados: previsões climáticas do BESM a serem corrigidas pelo DDPM; reanálises meteorológicas do ERA5. Para o BESM, foi usado um *ensemble* de 10 membros de previsões retrospectivas (*hindcasts*), com resolução horizontal de 1,875° (cerca de 208 km), para o período de 1993-2023. Quatro variáveis com valores diários foram selecionadas como preditores: precipitação, pressão na superfície, pressão no nível médio do mar e temperatura à superfície. Como dado de referência observacional para correção do BESM, usou-se a quinta geração de reanálise atmosférica do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), conhecida como ERA5 (Hersbach *et al.*, 2020). O ERA5 possui resolução horizontal de 0,25° (aprox. 27 km) e temporal em escala horária, sendo necessário um pós-processamento desses dados para equivalência de grade e tempo com o BESM. Com o objetivo de avaliar a eficácia da metodologia proposta, selecionou-se um estudo de caso representativo, correspondente ao evento de precipitação intensa registrado em 2 de dezembro de 2021. O BESM possui cobertura global, mas o estudo foi concentrado sobre a Região Sudeste, cobrindo uma área aproximada de 10° *x* 10° de latitude e longitude.

4.2. Resultados e discussões

Os resultados quantitativos demonstraram melhorias substanciais na acurácia das previsões quando comparadas ao ERA5 (dado observado), considerando os meses de dezembro de 2020 a 2023 na Região Sudeste: partindo de um RMSE de 14,26 mm/dia no BESM nativo, a correção de viés utilizando o método QM (Tong *et al.*, 2021) reduziu esse valor para 13,51 mm/dia. O DDPM do Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia (Cimatec) avançou ainda mais, atingindo 12,12 mm/dia (aproximadamente 10,32% mais preciso que o método QM), enquanto a estratégia *ensemble* alcançou o melhor resultado com 11,58 mm/dia, representando uma melhoria de aproximadamente 14,28% em relação à correção de viés com o método QM.

Os resultados espaciais estão consolidados na Figura 5. A análise comparativa revela um padrão consistente, indicando que o modelo Cimatec DDPM reproduziu as estruturas espaciais e a magnitude dos eventos observados no ERA5 em diferentes localizações. O BESM nativo, sem correção de viés (quarta coluna), tende a gerar campos de precipitação espacialmente superestimados quando comparados ao ERA5 (última coluna). O método de correção pelo método QM (segunda coluna), embora ajuste a magnitude geral, criou padrões distintos na comparação com a referência das reanálises. Em contraste, o modelo de IA criado para remoção de viés (primeira coluna) demonstra capacidade de gerar campos de precipitação com estruturas espaciais mais próximas ao *ground truth* do ERA5. Uma das principais contribuições do modelo Cimatec DDPM é a capacidade de aprender a distribuição de probabilidade condicional. Tal característica permite que o modelo não apenas corrija o viés médio, mas também reproduza o caráter estatístico completo do clima observado, incluindo a sua variabilidade e a frequência de eventos extremos.

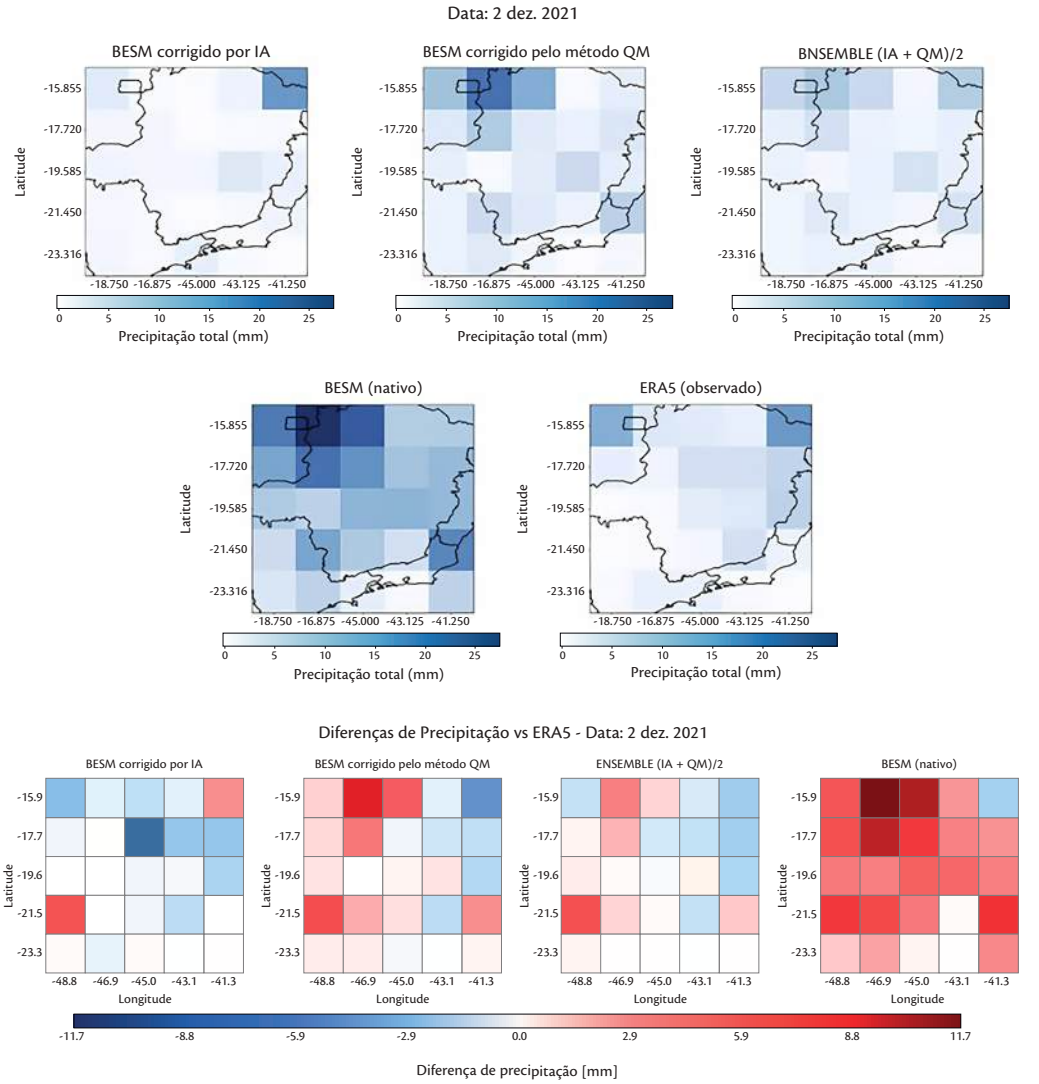


Figura 5 – Precipitação acumulada do dia 2 dez. 2021 do modelo BESM sem e com correção *versus* a referência observacional do ERA5 (linha superior) e da diferença destes modelos com o ERA5 (linha inferior)

Obs.: Na linha superior, os mapas mostram a precipitação total acumulada (mm) para o período de 2021-12-02: (a) BESM corrigido por IA (Cimatec DDPM); (b) BESM corrigido pelo método QM (Tong *et al.*, 2021); (c) *ensemble* (IA + QM)/2; (d) BESM nativo (sem correção de viés); e (e) ERA5 (dado observado). Na linha inferior, as diferenças de precipitação *versus* ERA5 são apresentadas por meio do desvio médio absoluto (mm) para cada método de correção em comparação ao ERA5.

Fonte: Elaboração própria

4.3. Considerações gerais

As melhorias metodológicas apresentadas demonstram implicações diretas para aplicações operacionais e de impacto. A reprodução mais fiel das distribuições de precipitação, corrigindo tanto a frequência de dias secos quanto a magnitude de eventos extremos, é um avanço crucial para estudos de impacto hidrológico, que dependem da precisão desses dados para modelar a resposta de bacias hidrográficas (Teutschbein; Seibert, 2012). A capacidade do modelo Cimatec DDPM de gerar campos espacialmente coerentes é particularmente relevante para a previsão de perigos localizados em áreas urbanas, como inundações repentinas e deslizamentos, que são diretamente influenciados por núcleos de precipitação intensa. Essa capacidade pode aprimorar os sistemas de suporte à decisão da defesa civil, permitindo a transição de alertas generalizados para avisos direcionados e mais eficazes. A redução do viés sistemático na previsão de precipitação se traduz em benefícios socioeconômicos tangíveis, especialmente na mitigação de perdas associadas a eventos hidrometeorológicos extremos.

Para o Sudeste brasileiro, uma região de alta relevância agrícola e com complexa gestão de recursos hídricos, a maior acurácia na previsão de extremos climáticos e de períodos de seca pode igualmente aprimorar a operação de reservatórios, gerando benefícios para a segurança hídrica e energética da nação. O aprimoramento da capacidade preditiva fortalece as estratégias de adaptação climática, fornecendo base técnica e sólida para planos municipais e estaduais alinhados às metas de acordos globais. No contexto da Conferência das Partes (COP30) [do Inglês, *Conference of the Parties*], a demonstração de uma tecnologia nacional avançada para a correção de viés em modelos climáticos posiciona o Brasil como um desenvolvedor de soluções para desafios globais, com potencial de transferência tecnológica para outros países em desenvolvimento que enfrentam limitações similares em seus sistemas de previsão climática.

5. Redução de escala

Prever o clima com mais precisão exige que os cientistas usem grades muito detalhadas para representar o oceano e a atmosfera – como se estivessem ampliando uma imagem para enxergar os mínimos detalhes. No entanto, quanto mais fina essa grade, maior a quantidade de cálculos que precisam ser feitos. Mesmo com supercomputadores, processar esses dados com alta resolução torna-se extremamente lento e, em muitos casos, impossível dentro de prazos razoáveis.

Apesar da dificuldade em se obter esses dados com alta resolução, eles são fundamentais. Quanto mais detalhadas forem as informações sobre o oceano e a atmosfera, maior a chance de detectar com antecedência eventos climáticos extremos, como enchentes, ondas de calor ou fortes tempestades. Essa previsão é essencial para que os órgãos responsáveis possam agir a tempo, proteger a população e mitigar os danos e prejuízos.

Uma solução promissora para esse desafio vem dos avanços recentes em IA. Técnicas modernas, originalmente desenvolvidas para melhorar imagens, agora também são aplicadas aos dados climáticos para aumentar sua resolução; reduzindo a necessidade de cálculos demorados. Esses métodos utilizam grandes volumes de dados históricos e modelos computacionais capazes de identificar padrões complexos, com possibilidade de refinar os resultados utilizando restrições matemáticas e físicas (Harder *et al.*, 2023). Com isso, conseguem gerar versões mais detalhadas e confiáveis das informações oceânicas e atmosféricas. Embora tenham surgido no campo do processamento de imagens, já foi demonstrado que essas tecnologias funcionam muito bem com dados climáticos (Rampal *et al.*, 2024).

O uso de IA representa alternativa muito mais rápida e econômica em comparação com os métodos tradicionais de simulação climática. Em vez de depender de supercomputadores para gerar previsões detalhadas a partir de um conjunto de condições iniciais, a IA consegue aprimorar previsões já existentes com alta eficiência. Isso permite que centros de monitoramento climático tenham acesso a dados mais precisos em menos tempo e com custos reduzidos – o que é essencial para responder, de forma ágil, a eventos extremos. A Figura 6 ilustra esse processo, ou seja, os dados climáticos de baixa resolução são refinados espacialmente por meio de IA.

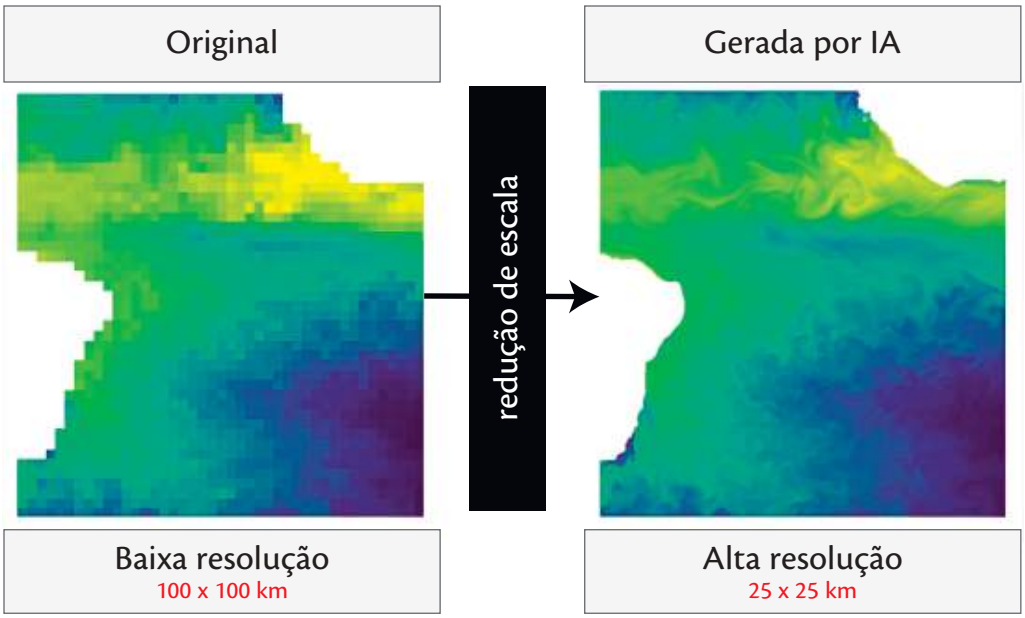


Figura 6 – Ilustração do processo de redução de escala em dados oceânicos (temperatura da superfície do mar)

Fonte: Elaboração própria.

Para exemplificar a aplicabilidade da técnica ao contexto do projeto, foram realizados experimentos para redução de escala: BESM GCM (100 km) para ERA (25 km) e BESM GCM (100 km) para a grade das previsões oceânicas Mercator[19] (8.3 km) – respectivamente, 4x e 12x como fatores de redução. Essa metodologia objetiva principalmente avaliar quão próximas as novas imagens geradas ficariam tanto em relação ao ERA e Mercator quanto em relação aos dados observados das boias do projeto PIRATA. Esse processo pode ser visualizado na Figura 7.

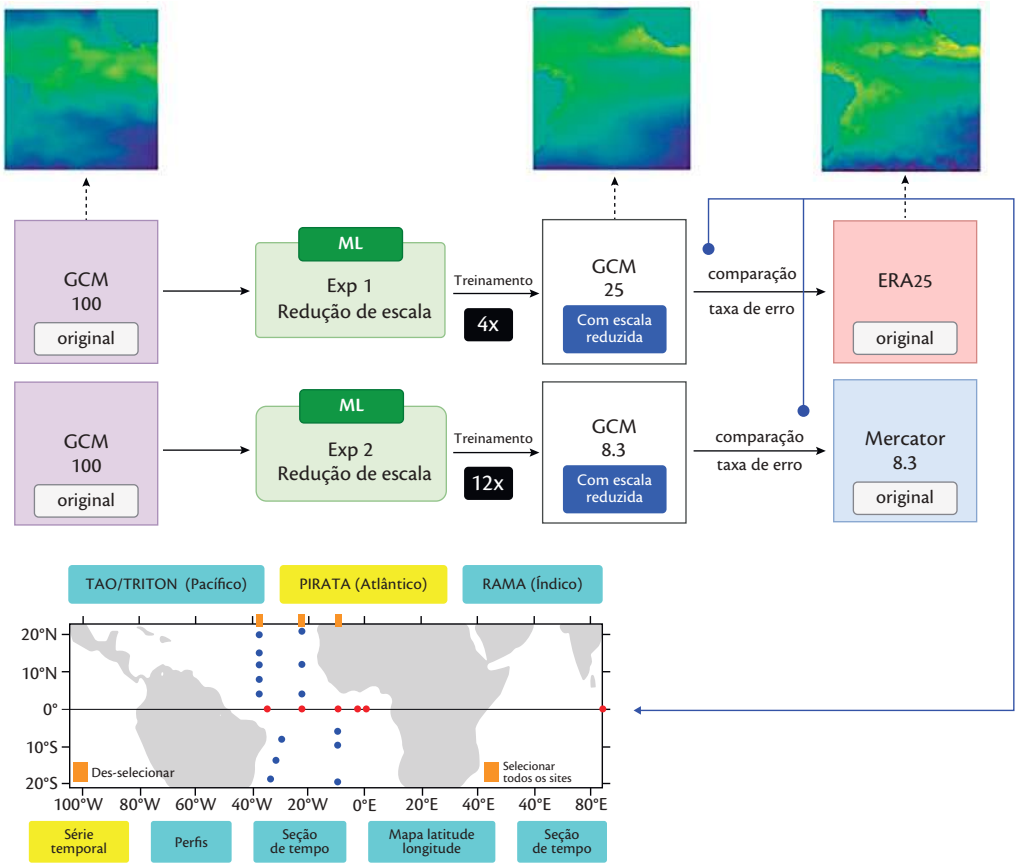


Figura 7 – Diagrama de fluxo da redução de escala

Obs.: Esse diagrama de escala parte de dados com medições espaçadas por 100 km (GCM) e resulta em dados com maior resolução, assemelhando-se a bases de dados, como ERA5 (25 km) e Mercator (8.3 km). Para validação do poder de reconstrução da IA, os valores são comparados com medições reais feitas por boias, fornecidas na base de dados PIRATA

Fonte: Elaboração própria. Dados elaborados com base em: https://www.pmel.noaa.gov/tao/drupal/disdel/.

19 Programa da União Europeia para previsões oceânicas.

Para ambos os experimentos, a redução de escala foi sobre a temperatura da superfície dos oceanos, e os períodos utilizados dos conjuntos de dados (GCM, ERA e Mercator) foram: 1993 a 2015 (para aprendizado de máquina); 2016 a 2018 (para validação); e 2019 a 2021 (para teste). O modelo de IA empregado foi o apresentado por Lim *et al.* (2017).

Após executá-los e de acordo com a Figura 8, os resultados demonstraram que: i) com o uso da técnica de redução de escala (*downscaling*), via IA, ao aumentar a resolução das imagens do GCM, observou-se maior poder preditivo das imagens geradas com um erro absoluto médio (MAE) [do Inglês, *mean absolute error*] em relação às imagens de comparação (ERA) de 0.47°C; e ii) para cada boia do PIRATA, ao comparar a média dos desvios do *downscaling* em relação à média de cada um dos demais conjuntos de dados, observou-se *performance* bem próxima ao ERA, reduzindo o desvio do GCM em média: 60%.

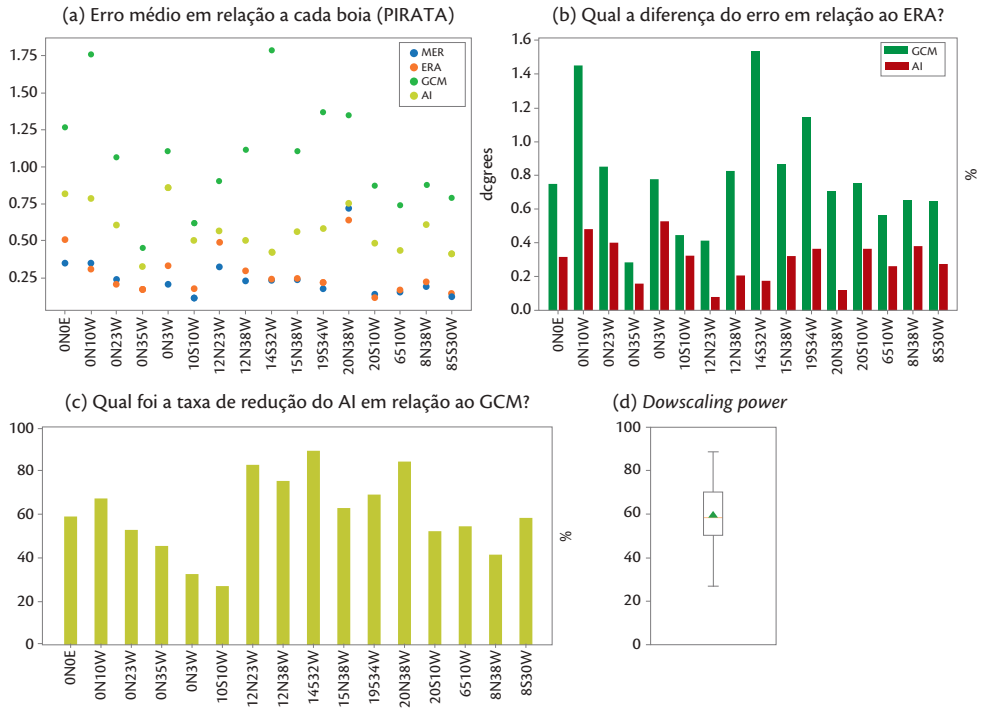


Figura 8 – ***Performance*** da IA

Obs.: (a) Os pontos correspondem à média do erro de diferentes *datasets* em relação à observação das boias do conjunto PIRATA. A partir dos dados do modelo de maior escala, GCM, os resultados da aplicação da IA aproximaram-se dos modelos de reanálise, ERA5 e Mercator; (b) ao comparar o erro médio do GCM e da IA em relação a cada boia, observa-se grande redução do erro com a aplicação da IA; (c) É descrita a porcentagem de redução do desvio obtida pelo IA em comparação ao GCM; e (d) Em média, a IA reduziu 60% do desvio do GCM.

Fonte: Elaboração própria.

6. Detecção de eventos extremos de tempo e clima e seus impactos sobre as cidades

Esta seção demonstra um arcabouço para a aplicação de IA para eventos extremos, tal como aquele proposto por Camps-Valls *et al.* (2025), que engloba três componentes fundamentais para a compreensão de tais eventos: detecção, previsão e avaliação de impactos (*vide* Figura 9). A etapa de detecção visa a localizar e caracterizar eventos anômalos em tempo e espaço, buscando identificar quando e onde podem ocorrer. Em seguida, o componente preditivo atua na projeção de tais eventos no futuro com base em séries temporais e dados observacionais multiescalares. Por fim, a avaliação de impactos permite estimar os efeitos esperados sobre a população, a infraestrutura e os sistemas ecológicos urbanos.

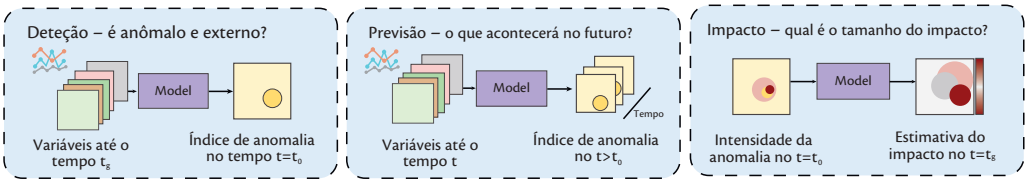


Figura 9 – Arcabouço para aplicação de IA na compreensão de eventos extremos

Fonte: Adaptado de Camps-Valls et al. (2025).

A articulação desses três componentes em um *pipeline* coeso potencializa não apenas a resposta emergencial em desastres naturais, mas também a formulação de políticas públicas fundamentadas e a melhoria contínua das estratégias de resiliência climática (Camps-Valls *et al.*, 2025).

A seguir são elencadas algumas abordagens possíveis de aplicação de diversas técnicas de IA sob as perspectivas do ora mencionado arcabouço, com base no contexto de eventos extremos de alto impacto potencial, como aqueles já citados anteriormente.

6.1. Detecção

A detecção de anomalias em séries temporais climáticas, especialmente aquelas associadas a eventos extremos, pode ser aprimorada por meio da combinação de modelos de IA e variáveis meteorológicas complementares. Para um estudo inicial de identificação automatizada de anomalias, no contexto do presente trabalho, foi testado o modelo proposto por Munir *et al.* (2019), que utiliza uma abordagem baseada em redes neurais convolucionais (CNN) [do Inglês, *convolutional neural network*] para detecção não supervisionada. O modelo realiza a previsão do

próximo valor da série a partir de uma janela de histórico e compara essa previsão com o valor observado, utilizando a diferença entre ambos – medida pela média acrescida de dois desvios-padrão – como escore de anomalia. Essa técnica mostrou-se especialmente eficaz na identificação de anomalias pontuais, contextuais e discordantes, mesmo em séries que apresentam tendência, sazonalidade e ruído.

No contexto do evento climático extremo ocorrido em São Sebastião em fevereiro de 2023, o modelo foi aplicado aos dados de precipitação diária da reanálise ERA5 entre 2020 e 2023. O modelo identificou os dias 18 e 19 de fevereiro como anômalos em relação ao padrão histórico quando aplicado na variável de precipitação (Figura 10), indicando sua capacidade de detectar eventos extremos com base em desvios significativos da normalidade climática na região estudada.

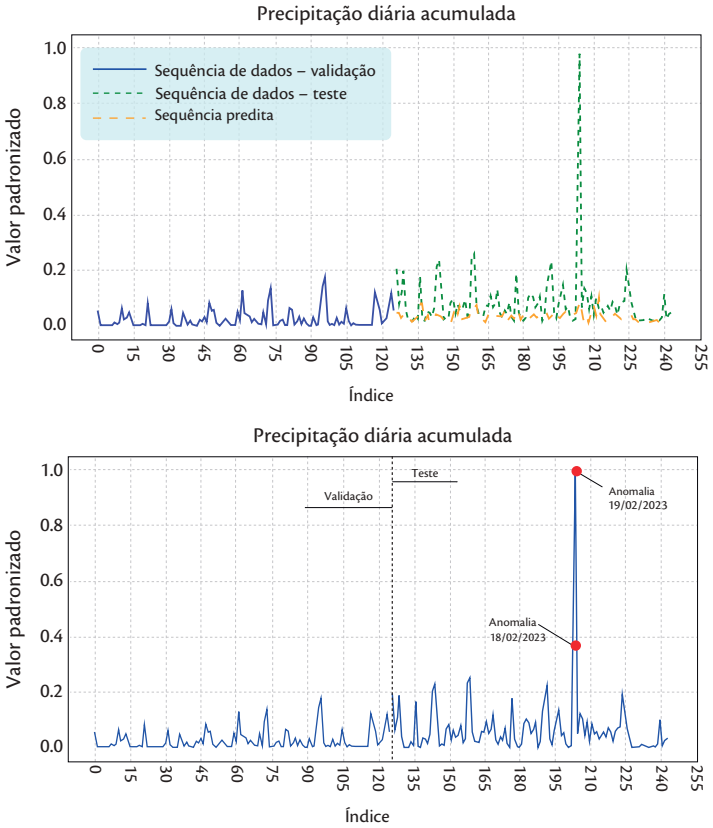


Figura 10 – Detecção de anomalias de precipitação acumulada no evento em São Sebastião

Obs.: No eixo X (índice diário na série histórica a partir de 4 dez. 2022) eixo Y (valor padronizado da precipitação diária acumulada).

Fonte: Elaboração própria.

Contudo, experimentos de redução de escala via IA, tais como aqueles citados na seção 5 (deste artigo: Redução de escala), podem proporcionar benefícios significativos para detecção e análise de eventos climáticos extremos, especialmente para sistemas de alerta social e econômico, tais como:

- Maior precisão espacial: a redução de escala de 100 km para 25 km (ERA) e 8,3 km (Mercator) permite identificar eventos climáticos extremos com muito maior detalhamento geográfico. Isso é crucial para alertas localizados, possibilitando avisos específicos para comunidades costeiras, portos, plataformas petrolíferas e rotas de navegação que antes ficavam "invisíveis" pela baixa resolução do GCM.
- Redução significativa de incertezas: a diminuição do erro absoluto médio para 0,4-0,5°C e a redução de 60% no desvio em relação aos dados observacionais das boias PIRATA representam melhoria substancial na confiabilidade das previsões.

Isso permite que gestores de risco tomem decisões mais assertivas sobre evacuações, suspensão de atividades marítimas ou acionamento de protocolos de emergência.

6.2. Previsão

A tarefa de previsão (*forecasting*), em cenários de eventos extremos, tem sido utilizada para mitigar impactos e apoiar processos de tomada de decisão. Técnicas de previsão baseadas em IA vêm se consolidando como ferramentas robustas para antecipar o comportamento de variáveis críticas, como intensidade de chuvas (Shi *et al.,* 2021), ventos (Liu *et al.,* 2020) e propagação de incêndios (Andrianarivony *et al.,* 2024).

Um avanço importante nesta área é o Prithvi Weather-Climate (Prithvi-WxC), um modelo fundacional desenvolvido em colaboração entre a *National Aeronautics and Space Administration* (Nasa) e a *International Business Machines Corporation* (IBM) (Schmude *et al.,* 2024). O Prithvi-WxC é projetado para replicar dinâmicas atmosféricas em múltiplas escalas e lidar com informações faltantes, utilizando uma arquitetura hierárquica baseada em transformadores. O modelo já foi aplicado em tarefas, como previsão de trajetória e intensidade de furacões, parametrização de ondas gravitacionais e redução de escala (*downscaling*) de modelos climáticos, demonstrando avanços na eficiência e na capacidade de representação de processos físicos em modelos meteorológicos e climáticos (Schmude *et al.,* 2024).

Complementarmente, novos *frameworks* de previsão espaço-temporal têm expandido as possibilidades de modelagem de eventos extremos dinâmicos. O GraphCast (Lam *et al.,* 2023), desenvolvido pela DeepMind, é um modelo baseado em grafos que realiza previsões globais

de tempo com resolução de 0,25 grau, utilizando dados históricos do ERA5. O modelo é capaz de prever variáveis, como pressão atmosférica e vento em até 10 dias, com precisão superior a modelos tradicionais e com menor custo computacional, permitindo previsões mais rápidas e detalhadas em escala global (Lam *et al.,* 2023).

Por sua vez, o GenCast (Price *et al.*,2025), também da DeepMind, adota uma abordagem baseada em modelos de difusão para previsão de tempo em médio prazo, gerando conjuntos de previsões (*ensemble forecasting*). Isso permite representar não apenas o cenário mais provável, mas também a incerteza associada às diferentes evoluções possíveis do sistema atmosférico, o que é especialmente relevante em situações de risco elevado (Price *et al.*,2025).

Essas abordagens demonstram como o avanço de *frameworks* baseados em IA está tornando o *forecasting* mais capaz de representar fenômenos extremos com maior detalhamento e eficiência, apoiando o desenvolvimento de ferramentas para avaliação e gestão de riscos associados a esses eventos.

6.3. Impacto sobre as cidades

A identificação antecipada de impactos sobre as cidades torna-se também essencial. É fundamental desenvolver métodos inovadores para a detecção de eventos extremos, visando ao aprimoramento dos sistemas de alerta precoce e à redução do número de fatalidades (Santos *et al.,* 2020). Uma comunicação eficaz do risco contribui para melhor preparo e resposta, com potencial de salvar vidas (Campos-Valls *et al.,* 2025; Marengo *et al.,* 2024; Valle *et al.,* 2022). A partir de alertas bem estruturados e de estratégias robustas de mitigação, baseadas em modelagem precisa, as avaliações de risco podem ser implementadas para proteger comunidades e infraestruturas vulneráveis (Mantovani *et al.,* 2025).

No contexto dos alertas antecipados, tecnologias como sensores de baixo custo para monitoramento de encostas e modelos de IA têm demonstrado grande potencial na detecção precoce de instabilidades e na geração de mapas de suscetibilidade das regiões (Otero *et al.,* 2022; Alcântara *et al.,* 2025). Além disso, os sistemas que permitem o envio de notificações sonoras por celular reforçam a importância de estratégias integradas ao fortalecimento da gestão de risco em regiões vulneráveis.

Nesse sentido, outra estratégia para a temática de cenários de risco é o monitoramento de redes sociais digitais. Tais dados podem ser utilizados para abastecer sistemas de alerta antecipado, contribuindo tanto na componente de ameaça (natural) quanto de impactos (sociais). Tal estratégia é particularmente interessante em contextos em que as técnicas convencionais de coleta de dados podem ser insuficientes (Drews *et al.,* 2023). Há uma desvantagem fundamental devido à sua

natureza reativa – os usuários precisam testemunhar ou ser afetados por uma inundação antes de publicar a respeito dela. Contudo, tal limitação pode ser utilizada exatamente para detecção das regiões mais atingidas.

Como estudo de caso, Hossaki *et al.* (2023) cunharam o termo "pluviômetro social", que considera menções a alagamentos em plataformas, por exemplo o Twitter, como fonte complementar de dados ao monitoramento de chuva. Hossaki *et al.* (2023; 2025) demonstraram dois pontos fundamentais, tomando a cidade de São Paulo como área de estudo:

1. Em dias com alagamentos, a atividade nas redes sociais sobre o dicionário previamente determinado no contexto de inundações é maior do que em dias sem alagamentos.
2. Há correlação significativa entre séries temporais dos diferentes domínios: redes sociais, pluviômetros e estações hidrológicas.

Ressaltam-se, em especial, duas vantagens da análise com base em redes sociais: baixo custo de início de operação e manutenção [mesmo com a compra de acesso de *Application Programming Interface* (API) específicas], e ganho de antecipação; alguns termos são relativos a "nuvens cinzas", que precedem as chuvas e seus impactos. A integração dessa base com dados meteorológicos e de impacto convencionais oferece uma estratégia mais abrangente e resiliente para cenários de risco de inundações – componente de ameaça (natural) e de impactos (sociais).

Por fim, é importante lembrar que alertas de risco de desastres vão além de alertas meteorológicos, devendo incorporar previsões de nível e vazão em diferentes trechos de rios e de umidade no solo e fator de segurança em diferentes porções de encostas. Ferramentas baseadas em IA são promissoras também nesse contexto (Duque *et al.*, 2024; Soares *et al.*, 2025). Além disso, é indispensável levar em consideração as vulnerabilidades do lugar, das pessoas, das infraestruturas e dos serviços expostos a cada ameaça. Novamente, as técnicas de matemática aplicada, no geral, e de IA, em particular, são auspiciosas (Santos *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2023).

7. Conclusões e próximos passos

Em conclusão, como visto nas seções acima, a IA mostra-se uma potente ferramenta tanto para a agregação de informações em bases de dados esparsos, quanto para a redução de escala e para a redução de vieses da previsão numérica gerada por modelo numérico do sistema terrestre. O artigo demonstra, assim, que a combinação de métodos consagrados de modelagem climática e técnicas de IA representam uma nova e promissora ferramenta para a previsão de eventos climáticos extremos, tais como secas e inundações de enormes proporções, com antecedência de meses e seus impactos na sociedade.

Os próximos passos desta pesquisa, já em curso, constituem na aplicação dos métodos de IA delineados neste artigo para um evento climático extremo, utilizando para tanto as bases de dados globais e os locais disponíveis, como previsões numéricas com alta resolução espaço-temporal, séries históricas de dados observados em estações continentais e oceânicas e imagens de satélites.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte financeiro da Secretaria de Transformação Digital (Setad), do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), ao Projeto Sistema Inteligente de Previsão de Extremos Climáticos (Sipec/PBIA) e à Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) pelo financiamento do Projeto Sistema Multiusuário para Detecção, Previsão e Monitoramento de Manchas de Óleo no Mar (SisMOM), referência Finep nº 1576/21.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), por meio do "Plano de Desenvolvimento Institucional na área de transformação digital: manufatura avançada e cidades inteligentes e sustentáveis (PDIp)" (Processo nº 2017/50348-2) e "EcoSustain: ciência de dados e computação para o meio ambiente" (Processo nº 2023/00811-0).

Ao SiDi por todo suporte, apoio e parceria no desenvolvimento do projeto e contribuição técnica e científica na construção do conhecimento.

Ao Centro de Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina (Ciaam) e ao Centro de Inteligência Artificial (C4AI) da Universidade de São Paulo (USP) pela parceria técnica e científica e participação na concepção metodológica do projeto.

Ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial/Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia (Senai Cimatec) e ao seu Centro de Supercomputação para Inovação Industrial (CS2I) por todo o suporte técnico e computacional para a execução das atividades deste projeto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo 446053/2023-6) e ao projeto do Instituto Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (INCT) para Mudanças Climáticas Fase II (Processo Fapesp nº 2014/50848-9).

Ao MCTI e à Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) pelos apoios financeiro e de navio para manutenção da rede de boias ancoradas do Projeto PIRATA, em parceria com a NOAA/EUA, *French Nacional Research Institute for Sustainable Development* (IRD) *MétéoFrance*/França.

Referências

ALCÂNTARA, E.; BAIÃO, C.F.; GUIMARÃES, Y.C.; MANTOVANI, J.R.; MARENGO, J.A. Machine learning approaches for mapping and predicting landslide-prone areas in São Sebastião (Southeast Brazil). **Natural Hazards Research**, v. 5, n. 2, p. 247-261, 2025. Disponível em: *https://www.researchgate.net/profile/Jose-Mantovani-4/publication/385061537_Machine_Learning_Approaches_for_Mapping_and_Predicting_Landslide-Prone_Areas_in_Sao_Sebastiao_Southeast_Brazil/links/6714d4ee09ba2d0c760ea787/Machine-Learning-Approaches-for-Mapping-and-Predicting-Landslide-Prone-Areas-in-Sao-Sebastiao-Southeast-Brazil.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2FoaW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2FoaW9uIn19*

ANDRIANARIVONY, H.S.; Akhloufi, M.A. Machine learning and deep learning for wildfire spread prediction: a review. **Fire,** v. 7, n. 12, p. 482, 2024. Disponível em: *https://www.mdpi.com/2571-6255/7/12/482/pdf?version=1734515358*

BARROS, Marcel *et al*. Early detection of extreme storm tide events using multimodal data processing. **Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence,** v. 38, n. 20, p. 21923-21931, 2024. Disponível em: *https://ojs.aaai.org/index.php/AAAI/article/view/30194/32120*

CAMPS-VALLS, G.; FERNÁNDEZ-TORRES, M.-Á.; COHRS, K.-H.; HÖHL, A. *et al*. Artificial intelligence for modeling and understanding extreme weather and climate events**. Nature Communications,** v. 16, n. 1, p. 1919. 2025. Disponível em: *https://www.researchgate.net/publication/389277932_Artificial_intelligence_for_modeling_and_understanding_extreme_weather_and_climate_events/fulltext/67bcb606207c0c20fa95906a/Artificial-intelligence-for-modeling-and-understanding-extreme-weather-and-climate-events.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2FoaW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2FoaW9uIn19*

CELASCHI, Sergio; XAVIER JR, Ademir L. Status of a Brazilian Automatic Hydro-meteorological territorial network. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇOES (SBRT2016), 34, 2016, Santarém, Brasil. **Anais**... Santarém, Brasil. 2016. Disponível em: *https://biblioteca.sbrt.org.br/articlefile/1474.pdf*

CHANTRY, M.; CHRISTENSEN, H.; DUEBEN, P.; PALMER, T. Opportunities and challenges for machine learning in weather and climate modelling: hard, medium and soft AI. **Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences,** v. 379, n. 2194, 2021. Disponível em: *https://royalsocietypublishing.org/doi/reader/10.1098/rsta.2020.0083*

DREWS, M.; STEINHAUSEN, M.; LARSEN, M.A.D.; DØMGÅRD, M.L.; HUSZTI, L.; RÁCZ, T.; WORTMANN, M.; HATTERMANN, F.F.; SCHRÖTER, K. The utility of using Volunteered Geographic Information (VGI) for evaluating pluvial flood models. **Science of the Total Environment,** v. 894, n. 164962, 2023. Disponível em: *https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/336967697/1-s2.0-S0048969723035854-main.pdf*

DUQUE, J.S.; SANTOS, R.; ARTEAGA, J.; OYARZABAL, R.S.; SANTOS, L.B.L. Nonlinear hydrological time series modeling to forecast river level dynamics in the Rio Negro Uruguay basin. **Chaos, An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science,** v. 34, n. 5, 3132, 2024. DOI:10.1063/5.0201784

FIGUEROA, Silvio N.; BONATTI, José P.; KUBOTA, Paulo Y. *et al.* The Brazilian global atmospheric model (BAM): performance for tropical rainfall forecasting and sensitivity to convective scheme and horizontal resolution. **Weather and Forecasting**, v. 31, n. 5, p. 1547-72, 2016. Disponível em: *https://journals.ametsoc.org/downloadpdf/view/journals/wefo/31/5/waf-d-16-0062_1.pdf*

HARDER, P.; HERNANDEZ-GARCIA, A.; RAMESH, V.; YANG, Q.; SATTEGERI, P.; SZWARCMAN, D.; WATSON, C.D.; ROLNICK, D. Hard-constrained deep learning for climate downscaling. **Journal of Machine Learning Research,** v. 24, n. 1, 2023. Disponível em: *https://www.jmlr.org/papers/volume24/23-0158/23-0158.pdf*

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S. *et al.* The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, p. 1999-2049, 2020. Disponível em: *https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/qj.3803*

HO, J.; JAIN, A.; ABBEEL, P. Denoising diffusion probabilistic models. **Advances in Neural Information Processing Systems**, v. 33, p. 6840-6851, 2020. Disponível em: *https://arxiv.org/pdf/2006.11239*

HOSSAKI, V.Y.; NEGRI, R.G.; SANTOS, L.B.L.; MENDES, T.S.G.; BRESSANE, A. Combining social media data and meteorological sensors for urban flood detection: a statistical analysis in São Paulo City. **Earth Science Informatics,** v. 18, n. 3, 2025. DOI:10.1007/s12145-025-01802-3

HOSSAKI, V.Y.; SERON, W.F.M.S.; NEGRI, R.G.; LONDE, L.R.; TOMÁS, L.R.; BACELAR, R.B.; ANDRADE, S.C.; SANTOS, L.B.L. Physical- and social-based rain gauges – a case study on urban flood detection. **Geosciences**, v. 13, n. 4, 2023. Disponível em: *https://www.mdpi.com/2076-3263/13/4/111/pdf?version=1680745325*

HU, Junfeng; LIU, Xu; FAN, Zhencheng; LIANG, Yuxuan; ZIMMERMANN, Roger. Towards unifying diffusion models for probabilistic spatio-temporal graph learning. *In*: SIGSPATIAL '24: ACM International Conference On Advances In Geographic Information Systems, 32., Atlanta GA USA. 2024. **Anais** ... Atlanta GA USA: 2024. p. 135-146. Disponível em: *https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3678717.3691235. Acesso em: 20 fev. 2025.*

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Elaboração do plano municipal de redução de riscos (PMRR) para o município de São Sebastião, SP.** Relatório Técnico Nº 155131–205 SDECTI/Patem. São Paulo: IPT. 2018. Disponível em: *https://www.sidec.sp.gov.br/map_risco/uploads/doc1637073821.pdf*

LAM, R.; SANCHEZ-GONZALEZ, A.; WILLSON, M.; WIRNSBERGER, P. *et al.* Learning skillful medium-range global weather forecasting. **Science,** 382, p. 1416-1421, 2023. Disponível em: *https:\www.science.org\doi\10.1126\science.adi2336*

LI, L.; CARVER, R.; LOPEZ-GOMEZ, I.; SHA, F.; ANDERSON, J. SEEDS: Emulation of weather forecast ensembles with diffusion models. **SCIENCE ADVANCES**, v. 10, n. 13, 2024. Disponível em: *https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adk4489*

LIANG, Guojun; TIWARI, Prayag; NOWACZYK, Sławomir; BYTTNER, Stefan. Higher-order spatio-temporal physics-incorporated graph neural network for multivariate time series imputation. *In*: PROCEEDINGS OF THE 33RD ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND KNOWLEDGE MANAGEMENT 2024, New York, NY, USA. **Anais** [...]. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2024. p. 1356-1366. DOI: 10.1145/3627673.3679775. Disponível em: *https://dl.acm.org/doi/10.1145/3627673.3679775*. Acesso em: 11 jun. 2025.

LIU, X.; ZHANG, H.; KONG, X.; LEE, K.Y. Wind speed forecasting using deep learning models. **Atmospheric Research,** v. 234, n. 105314, 2020. DOI:10.1109/ICSSEECC61126.2024.10649504

LIU, Mingzhe; HUANG, Han; FENG, Hao; SUN, Leilei; DU, Bowen; FU, Yanjie. PriSTI: A Conditional diffusion framework for spatiotemporal imputation. **2023 IEEE 39th International Conference on Data Engineering (ICDE)**, Anaheim, CA, USA, p. 1927-1939, 2023. DOI: 10.1109/ICDE55515.2023.00150

LIM, B.; SON, S.; KIM, H.; NAH, S.; LEE, K.M. Enhanced deep residual networks for single image super-resolution**. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW**), Honolulu, HI, USA, p. 1132-1140, 2017. DOI: 10.1109/CVPRW.2017.151.

MANTOVANI, J.R.; ALCÂNTARA, E.; BAIÃO, C.F.; PAMPUCH, L.; CURTARELLI, M.P.; RIBEIRO, J.V.M.; GUIMARÃES, Y.C.; LONDE, L.; MASSI, K.; MARENGO, J.; NOBRE, C.A.; ASSIREU, A.T.; BORTOLOZO, C.A.; SIMÕES, S.J.; TOMASELLA, J.; MORAES, O.L.L.; PARK, E. Unprecedented flooding in Porto Alegre Metropolitan Region (Southern Brazil) in May 2024: Causes, risks, and impacts. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 160, n. 105533, jul. 2025. *https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105533*

MARAUN, D.; WIDMANN, M. **Statistical downscaling and bias correction for climate research**. Cambridge University Press. 2018. *https://doi.org/10.1017/9781107588783*

MARENGO, J.A.; CUNHA, A.P.; SELUCHI, M.E.; CAMARINHA, P.I.; DOLIF, G.; SPERLING, V.B.; ALCÂNTARA, E.H.; RAMOS, A.M.; ANDRADE, M.M.; STABILE, R.A.; MANTOVANI, J.; PARK, E.; ALVALA, R.C.; MORAES, O.L.; NOBRE, C.A.; GONCALVES, D. Heavy rains and hydrogeological disasters on February 18th–19th, 2023, in the city of São Sebastião, São Paulo, Brazil: from meteorological causes to early warnings**. Natural Hazards,** v. 120, 7997-8024, 2024. *https://doi.org/10.1007/s11069-024-06558-5*

MARDANI, M.; JACOBSON, N.; ZHOU, D.; PATHAK, J. *et al*. Residual corrective diffusion modeling for km-scale atmospheric downscaling. **Communications Earth & Environment**, v. 6, n. 1, 2025. Disponível em: *https://www.researchgate.net/journal/Communications-Earth-Environment-2662-4435/publication/389283390_Residual_corrective_diffusion_modeling_for_km-scale_atmospheric_downscaling/links/67bd419896e7fb48b9ccddda/Residual-corrective-diffusion-modeling-for-km-scale-atmospheric-downscaling.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2FoaW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2FoaW9uIn19*

MARISCA, Ivan; CINI, Andrea; ALIPPI, Cesare. Learning to reconstruct missing data from spatiotemporal graphs with sparse observations. **Advances in Neural Information Processing Systems**, v. 35, p. 32069-32082, 2022. Disponível em: *https://arxiv.org/pdf/2205.13479*

MATERIA, S.; GARCÍA, L.P.; VAN STRAATEN, C.O.S.; MAMALAKIS, A.; CAVICCHIA, L.; COUMOU, D.; DE LUCA, P.; KRETSCHMER, M.; DONAT, M. Artificial intelligence for climate prediction of extremes: State of the art, challenges, and future perspectives. **WIREs Climate Change,** v. 15, n. 6, 2024. Disponível em: *https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/wcc.914*

MCPHADEN, Michael J. *et al.* The global tropical moored buoy array. **Proceedings of OceanObs**, v. 9, p. 668–682, 2010. Disponível em: *https://www.aoml.noaa.gov/phod/docs/McPhaden_TheGlobalTropical.pdf*

MUNIR, M.; SIDDIQUI, S.A.; DENGEL, A.; AHMED, S. DeepAnT: A deep learning approach for unsupervised anomaly detection in time series. **IEEE Access**, v. 7, 1991-2005, 2019. Disponível em: *https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8581424*

NESET, T.-S.; VROTSOU, K.; ANDERSSON, L.; NAVARRA, C.; SCHÜCK, F.; EDSTRÖM, M.M.; RYDHOLM, C.; VILLARO, C.G.; KUCHER, K.; LINNÉR, B. Artificial intelligence in support of weather warnings and climate adaptation. **Climate Risk Management**, v. 46, n. 2, p. 100673, 2024. Disponível em: *https://www.researchgate.net/profile/Kostiantyn-Kucher/publication/386081715_Artificial_intelligence_in_support_of_weather_warnings_and_climate_adaptation/links/6749d59b790d154bf9b57590/Artificial-intelligence-in-support-of-weather-warnings-and-climate-adaptation.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2FoaW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2FoaW9uIn19*

NOBRE, Paulo; SIQUEIRA, Leo S.P.; ALMEIDA, Roberto A.F. de *et al.* Climate simulation and change in the Brazilian climate model. **Journal of Climate,** v. 26, n. 17, p. 6716-32, 2013. Disponível em: *http://www.researchgate.net/profile/Mabel_Costa/publication/273635330_Climate_Simulation_and_Change_in_the_Brazilian_Climate_Model/links/5507ab7b0cf26ff55f7ed28d.pdf*

NOBRE, Paulo; VEIGA, Sandro F.; GIAROLLA, Emanuel *et al.* AMOC decline and recovery in a warmer climate. **Scientific Reports,** v. 13, n. 1, p. 15928, 2023. Disponível em: *https://www.nature.com/articles/s41598-023-43143-5.pdf*

OTERO, M.D.; ABREU, A.E.S.; ASKARINEJAD, A.; GUIMARÃES, M.P.P.; MACEDO, E.S.; CORSI, A.C.; ALMEIDA, R.Z.H. Use of low -cost accelerometers for landslides monitoring: results from a flume experiment. **Soils and Rocks**, v. 45, n. 3, 2022. Disponível em: *https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/132988397/380.pdf*

PRICE, I.; SANCHEZ-GONZALEZ, A.; ALET, F.; ANDERSSON, T.R.; EL-KADI, A.; MASTERS, D.; EWALDS, T.; STOTT, J. Probabilistic weather forecasting with machine learning. **Nature,** n. 637, p. 84-104, 2025. Disponível em: *https://www.nature.com/articles/s41586-024-08252-9.pdf*

PRICE, I.; SANCHEZ-GONZALEZ, A.; ALET, F.; EWALDS, T. *et al.* GenCast: Diffusion-based ensemble forecasting for medium-range weather. **arXiv**. 2023. Disponível em: *https://arxiv.org/pdf/2312.15796*

RAMPAL, N.; HOBEICHI, S.; GIBSON, P.; MEDINA, J.; ABRAMOWITZ, G.; BEUCLER, T.; GONZÁLEZ-ABAD, J.; CHAPMAN, W.; GUTIÉRREZ, J. Enhancing regional climate downscaling through advances in machine learning. **Artificial Intelligence for the Earth Systems**, v. 3, n. 2, 2024. Disponível em: *https://journals.ametsoc.org/downloadpdf/view/journals/aies/3/2/AIES-D-23-0066.1.pdf*

SANTOS, A.S.; CORSI, A.C.; TEIXEIRA, I.C.; GAVA, V.L.; FALCETTA, F.A.M.; MACEDO, E.S.; AZEVEDO, C.S.; LIMA, K.T.B.; BRAGHETTO, K.R. Brazilian natural disasters integrated into cyber-physical systems: computational challenges for landslides and floods in urban ecosystems. **2020 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2),** Piscataway, NJ, USA, 2020, p. 1-8. **DOI:** 10.1109/ISC251055.2020.9239011

SANTOS, L.B.L.; SOARES, G.G.; GARG, T.; JORGE, A.A.S.; LONDE, L.R.; REANI, R.T.; BACELAR, R.B.; OLIVEIRA, C.E.S.; FREITAS, V.L.S.; SOKOLOV, I.M. Vulnerability analysis in complex networks under a flood risk reduction point of view. **Frontiers in Physics**, v. 11, n. 1, 2023. Disponível em: *https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2023.1064122/pdf*

SANTOS, L.B.L.; CARVALHO, T.; ANDERSON, L.O.; RUDORFF, C.; MARCHEZZINI, V.; LONDE, L.R.; SAITO, S.M. An RS-GIS-based comprehensive impact assessment of floods – a case study in Madeira River, Western Brazilian Amazon. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 14, n. 9, p. 1614-1617, 2017. DOI:10.1109/LGRS.2017.2726524

SCARSELLI, F.; GORI, M.; AH CHUNG TSOI; HAGENBUCHNER, M.; MONFARDINI, G. The Graph neural network model. **IEEE Transactions on Neural Networks**, v. 20, n. 1, p. 61-80, 2009. Disponível em: *https://ro.uow.edu.au/articles/journal_contribution/The_graph_neural_network_model/27757629/1/files/50520873.pdf*

SCHMUDE, J.; ROY, S.; TROJAK, W.; JAKUBIK, J.; CIVITARESE, D.S.; SINGH, S.; KUEHNERT, J.; ANKUR, K.; GUPTA, A.; PHILLIPS, C.E.; KIENZLER, R.; SZWARCMAN, D.; GAUR, V.; SHINDE, R.; LAL, R.; DA SILVA, A.; GUEVARA DIAZ, J.L.; JONES, A.; PFREUNDSCHUH, S.; LIN, A.; SHESHADRI, A.; NAIR, U.; ANANTHARAJ, V.; HAMANN, H.; WATSON, C.; MASKEY, M.; TSENGDAR, J. Prithvi WxC: Foundation Model for Weather and Climate. 2024. Preprint (**arXiv:**2409.13598). Disponível em: *https://arxiv.org/pdf/2409.13598*

SHI, X.; GAO, Z.; LAUSEN, L.; WANG, H.; YEUNG, D.; WONG, W.; WOO, W. Deep learning for precipitation nowcasting: A benchmark and a new model. **Scientific Reports,** v. 11, n. 1, 2021. Disponível em: *https://arxiv.org/pdf/1706.03458*

SOARES, J.A.J.P.; OZELIM, L.C.S.M.; BACELAR, L.; RIBEIRO, D.B.; STEPHANY, S.; SANTOS, L.BL. (2025). ML4FF: A machine-learning framework for flash flood forecasting applied to a Brazilian watershed. **Journal of Hydrology,** v. 652, p. 132674, 2025. *https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132674*

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: review and evaluation of different methods. **Journal of Hydrology,** v. 456-457, p. 12-29, 2012. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052.

TONG, Y.; GAO, X.; HAN, Z.; XU, Y.; XU, Y.; GIORGI, F. Bias correction of temperature and precipitation over China for RCM simulations using the QM and QDM methods. **Climate Dynamics**, v. 57, p. 1425-1443, 2021. Disponível em: *https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00382-020-05447-4.pdf*

VALLE, V.A.S.; ABREU, J.V.; FERNANDEZ, C.A.S. Desastre relacionado às chuvas intensas na Baixada Santista em março de 2020: a experiência das Defesas Civis de Guarujá e Santos. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – RBGEA**, v. 12, n. 1, 2022. Disponível em: *https://www.abge.org.br/downloads/9.pdf*

VELIČKOVIĆ, Petar; CUCURULL, Guillem; CASANOVA, Arantxa; ROMERO, Adriana; LIÒ, Pietro; BENGIO, Yoshua. Graph Attention Networks. *In:* SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON LEARNING REPRESENTATIONS 2018, **Anais**... 2018. Disponível em: *https://openreview.net/forum?id=rJXMpikCZ*. Acesso em: 26 maio. 2024.

WANG, Jun; DU, Wenjie; CAO, Wei; ZHANG, Keli; WANG, Wenjia; LIANG, Yuxuan; WEN, Qingsong. Deep learning for multivariate time series imputation: a survey. **arXiv,** 2024. Disponível em: *http://arxiv.org/abs/2402.04059.* Acesso em: 13 fev. 2025.

A construção de um projeto nacional de transição energética frente aos dilemas atuais da cooperação internacional na COP30

Thiago Vasconcellos Barral Ferreira[1], *Leandro Albuquerque de Oliveira*[2]

Resumo

O artigo analisa o atual estágio e os desafios da transição energética no Brasil, à luz dos cenários prospectivos do Plano Nacional de Energia 2055 (EPE, 2025). Apesar de o País possuir uma matriz energética com elevada participação de fontes renováveis na comparação com a média mundial, ainda enfrenta obstáculos relevantes, como a elevada dependência de combustíveis fósseis no setor de transportes e a necessidade de crescer substancialmente a oferta de energia. Este texto destaca a importância da construção de uma transição energética justa e inclusiva, apoiada por novos marcos legais, instrumentos regulatórios e investimentos em infraestrutura e inovação. Também enfatiza o papel estratégico do Brasil na governança climática global, especialmente

Abstract

The article analyzes the current stage and challenges of the energy transition in Brazil, in light of the prospective scenarios outlined in the National Energy Plan 2055. Although the country has an energy matrix with a high share of renewable sources compared to the global average, it still faces significant obstacles, such as the heavy dependence on fossil fuels in the transport sector and the need to substantially increase energy supply. The text highlights the importance of building a just and inclusive energy transition, supported by new legal frameworks, regulatory instruments, and investments in infrastructure and innovation. It also emphasizes Brazil's strategic role in global climate governance, especially as host

1 Mestre em Recursos Hídricos. Diretor do Registro da Secretaria de Mercado de Carbono do Ministério da Fazenda (MF).
2 Pós-graduado em Direito Público e em Regulação. Secretário adjunto de Infraestrutura e Regulação Econômica da Casa Civil da Presidência da República.

como anfitrião da trigésima Conferência das Partes (COP30), em que o País poderá influenciar o debate internacional sobre financiamento, justiça climática e implementação de metas de descarbonização. A abordagem integrada entre política energética, climática e socioeconômica é apontada como essencial para garantir uma trajetória sustentável e equitativa de desenvolvimento.

Palavras-chave: Transição energética. Política energética brasileira. Cenários energéticos. Descarbonização. Justiça climática. COP30. Desenvolvimento sustentável. Cooperação internacional.

of COP30, where the country will be able to influence international debates on finance, climate justice, and the implementation of decarbonization targets. An integrated approach across energy, climate, and socioeconomic policies is identified as essential to ensuring a sustainable and equitable development path.

Keywords: *Energy transition. Brazilian energy policy. Energy scenarios. Decarbonization. Climate justice. COP30. Sustainable development. Internacional cooperation.*

1. Introdução

O desafio das mudanças climáticas será colocado em perspectiva na Conferência das Partes 30 (COP30) em busca de respostas concretas. O nível de esforço a ser implementado pelos países envolve a definição de estratégias nacionais consolidadas, para serem desdobradas em políticas públicas e mobilização da iniciativa privada para avançar em direção a transições energéticas possíveis. Essa análise dos caminhos a serem seguidos por cada estado beneficia-se amplamente da construção de cenários para apoiar a decisão, ao colocar, em matriz de decisão alternativas, tecnologias e custos. No caso brasileiro, essa cenarização é o Plano Nacional de Energia, que projeta evoluções possíveis para a energia no Brasil para 30 anos. Esse planejamento precisa ser compatibilizado com outros planejamentos setoriais para construção de um planejamento que defina a estratégia climática do País, dando credibilidade e factibilidade às suas ambições. Este artigo detalha esse caminho percorrido pelo Brasil até aqui, com foco especial no setor de energia e projetando essa construção, que também visa a inspirar e mobilizar os demais países para a COP30.

2. Cenários para uma transição energética justa e inclusiva

Em janeiro de 2025, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) publicou um trabalho fundamental no marco da transição energética brasileira. Trata-se do documento *Cenários Energéticos* do Plano

Nacional de Energia 2055 (EPE, 2025a). As provocações ali contidas merecem atenção e reflexão, especialmente nesse crucial momento de implementação das ambições climáticas globais e nacionais.

Planejar o setor energético para um horizonte temporal longo, como é 2055, sujeito a infinitas variáveis, cercado de enormes incertezas, riscos e oportunidades, não se faz traçando uma linha reta até um ponto fixo no futuro. É inútil tentar perseguir um caminho ótimo, ideal. Planejamento nesse contexto é, sobretudo, um esforço para minimizar os arrependimentos diante das decisões que precisam ser tomadas sob profunda incerteza e influenciadas por fatores fora da nossa gestão. Para isso, a ferramenta mais apropriada são os cenários.

Cenários não são previsões, nem tentativas de acertar o que vai acontecer. São exercícios de imaginar diferentes formas de futuro, buscando descrever histórias consistentes no seu conjunto. Podem ser futuros desejados ou não. Podem ser altamente desafiadores ou refletir uma acomodação das tendências ou *status quo*. Normalmente, não atribuímos uma probabilidade de ocorrência a cada um dos cenários, embora alguns possam ser mais críveis que outros.

Quanto maior o número de cenários elaborados, sua abrangência e diversidade na representação de variáveis, incertezas, riscos e oportunidades, mais os tomadores de decisão podem exercitar o espectro de resultados potenciais de suas escolhas, seja no contexto de formulação de uma política pública, seja de uma estratégia empresarial de investimentos. Com isso, pode-se perseguir um ou mais objetivos tendo à mão elementos para construir resiliência e minimizar os custos de arrependimento.

O caderno do Plano Nacional de Energia 2055 propõe cinco diferentes cenários de transição energética para o Brasil:

- *Transição para todos*: cenário ideal, de transição energética justa e inclusiva como vetor de desenvolvimento sustentável, com sistema energético resiliente e inteligente, alcançando neutralidade de carbono em 2050.
- *Transição para quem*: transição energética sem plena justiça energética, ainda que com um sistema energético resiliente e inteligente, focando em descarbonização, descentralização e digitalização, mas sem a adequada democratização.
- *Transição desperdiçada*: a transição energética avança pouco, com um sistema energético pouco resiliente, redução tímida da pobreza energética e avanços insuficientes para alcance da neutralidade de carbono.
- *Transição para quê*: não acontece transição justa e inclusiva, enquanto o sistema energético é vulnerável e obsoleto, e o País fica longe de alcançar a neutralidade de carbono.

- *Transição bloqueada*: a transição energética é bloqueada por forte pressão de custos, com redução tímida da pobreza energética, e os avanços nos setores de uso de biocombustíveis e redução do desmatamento são insuficientes para alcance de neutralidade de carbono.

Com essa provocação, a EPE busca amadurecer o debate para a construção de uma transição energética que seja compatível com as ambições climáticas do País ao mesmo tempo que esse processo seja um vetor de desenvolvimento socioeconômico, evitando perpetuar as profundas desigualdades e injustiças que tanto marcam a história e a sociedade brasileira.

Em suma, chama-se atenção para algo que pode parecer óbvio: não devemos tomar como garantido que a transição energética será um processo justo e inclusivo. A transição pode ser um processo determinante no sucesso do Brasil, neste século 21, ou uma oportunidade desperdiçada.

Os cenários são, assim, ferramenta central para antever resultados possíveis, avaliar custos e relacionar diferentes variáveis e, por fim, tentar ajustar rotas. No caso presente, a cenarização tem o propósito de evitar que a transição energética seja tímida na ambição climática ou que não produza os efeitos sociais e econômicos desejados.

3. Avanços e desafios na transição energética brasileira

O Brasil tem a matriz energética mais renovável entre as maiores economias do mundo, tendo superado a marca dos 50% de participação de fontes renováveis na oferta de energia no País em 2024, enquanto o mundo, na média, ainda, está em cerca de 15%. No setor elétrico, em particular, o patamar de participação de renováveis tem ficado consistentemente acima de 85% nos últimos anos, beirando os 90% em 2024. A energia nuclear também se soma às renováveis na oferta de energia não emissora de gases de efeito estufa.

Esse quadro decorre de décadas de desenvolvimento da produção e do uso de bicombustíveis, principalmente o etanol e o biodiesel, bem como a construção de uma matriz elétrica baseada em hidroeletricidade, e, nos últimos 15 anos, em termelétricas (a biomassa), a energia eólica e solar. O programa nuclear brasileiro – resultando na construção das usinas de Angra 1 e 2, a criação de um complexo industrial do urânio – e as políticas de conservação e eficiência energética [como exemplos: o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) e o Programa Brasileiro de Etiquetagem] somam-se ao protagonismo das renováveis no Brasil.

No entanto, seria equivocado afirmar que esse patamar de renovabilidade da matriz energética significa que o Brasil já tenha completado sua transição energética. Isso porque os atuais 50% de participação de renováveis são insuficientes para manter uma trajetória consistente com sua

ambição climática de alcançar emissões líquidas zero até 2050. Novos recursos de baixo carbono, novas tecnologias e massivos investimentos em infraestrutura precisarão ser desenvolvidos para avançar, palmo a palmo, rumo a uma economia de baixo carbono, abrangendo os setores de difícil descarbonização, especialmente nos transportes, e alguns segmentos industriais.

Vale ilustrar com alguns números. As emissões de gases de efeito estufa relativas à produção e ao consumo de energia no Brasil são altamente concentradas no setor de transportes, representando 53% do total em 2024. Esse peso está muito relacionado ao modal rodoviário que predomina no transporte de cargas no Brasil, mesmo com longas distâncias, modal este altamente dependente do uso de diesel fóssil. Ao abrir as emissões na produção e no consumo de energia, o Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 (EPE, 2025b), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética sob diretrizes do Ministério de Minas e Energia (MME), indica que o diesel representa de 42% a 43% do total dessas emissões ao longo do decênio. Já o gás natural e a gasolina, juntos, somam algo entre 33% e 34% no mesmo período.

Além do desafio de avançar nos setores de difícil descarbonização, também é preciso ter em conta que o atual consumo energético *per capita* no Brasil ainda está em patamares bastante inferiores aos de países desenvolvidos. Isso não surpreende, dada a forte correlação entre o padrão de acesso a serviços energéticos e o desenvolvimento socioeconômico de uma região ou país. A título de exemplo, o consumo energético *per capita* no Brasil é atualmente metade do que se observa na média da União Europeia. O consumo *per capita* na Coreia do Sul, por sua vez, supera 3,7 vezes o valor no Brasil, e, na comparação com os Estados Unidos da América (EUA) e a Arábia Saudita, supera quatro vezes.

Isso significa que o Brasil deve seguir uma trajetória de forte crescimento da demanda energética nas próximas décadas, mesmo considerando ganhos de eficiência energética, o que impulsiona a necessidade de grandes investimentos na expansão da oferta e infraestrutura de energia. Sustentar esse crescimento sem comprometer a qualidade ambiental da nossa matriz energética e, ainda, ampliar a participação de energia limpa exigem um relevante esforço combinado de políticas públicas e de engajamento do setor empresarial.

Diante desses desafios e oportunidades, o Brasil tem dado passos sólidos na construção de sua trajetória de descarbonização da energia, tanto pelo lado da oferta quanto da demanda.

É consenso que marcos legais e regulatórios são essenciais para trazer segurança jurídica para os investimentos na transição energética, especialmente aqueles na fronteira tecnológica e de mercado. Nessa seara, o período de 2023 a 2025 foi bastante profícuo na aprovação de significativas leis, com destaques para:

- Marco Legal do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Leis nº 14.948/2024 e nº 14.990/2024) (Brasil, 2024a; 2024b).
- Programa Combustível do Futuro (Lei nº 14.993/2024) (Brasil, 2024c).
- Marco Legal das Eólicas *offshore* (Lei nº 15.097/2025) (Brasil, 2025a).
- Lei do Mercado de Carbono (Lei nº 15.042/2024) (Brasil, 2024d).
- Programa de Aceleração da Transição Energética (Paten) (Lei nº 15.103/2025) (Brasil, 2025b).
- Programa Mobilidade Verde e Inovação (Mover) (Lei nº 14.902/2024) (Brasil, 2024e).
- Programa Eco Invest (Lei nº 14.995/2024) (Brasil, 2024f).

O desafio agora está em regulamentar e implementar essas diversas frentes com adequada qualidade técnica, transparência, diálogo e velocidade. Para engajamento das partes interessadas, é recomendável a divulgação de uma agenda de elaboração de decretos, portarias, resoluções normativas e outros atos infralegais necessários, a exemplo do Roteiro de Implementação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), publicado pelo Ministério da Fazenda (MF) (Brasil, 2024d), com uma visão geral das etapas e definições necessárias para implementar o mercado de carbono. Outro exemplo é o planejamento do Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) para elaboração e publicação de decreto regulamentador do marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono, com realização do *workshop*, em março de 2025, que apresentou e debateu os principais aspectos com os agentes interessados.

Um ponto de atenção é que o sucesso dos novos marcos legais citados previamente, na sua maioria, depende de um setor elétrico organizado, funcional, equilibrado, seguro e sustentável, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico-financeiro. O sistema elétrico é fundamental para sustentar não só o desenvolvimento socioeconômico do País, mas também a eletrificação e descarbonização de segmentos diversos da economia. A oferta segura, sustentável e competitiva de energia elétrica também é vital para uma chamada "eletrificação indireta", por exemplo na produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água.

A expansão do sistema elétrico em bases sustentáveis, também, será desafiadora, considerando que o setor será fortemente pressionado a incrementar sua participação nos setores de transporte e indústria, com progressiva eletrificação de frotas e processos industriais.

Todavia, muito embora o sistema elétrico brasileiro seja motivo de orgulho ao País, pela elevada e diversa participação de fontes renováveis e uma robusta rede de transmissão que integra a maior parte do nosso País, também é sabido que esse setor vem acumulando distorções ao longo do tempo, tais como subsídios elevados e ineficientes, precificação descolada dos efetivos requisitos

sistêmicos e das leis determinando compras compulsórias sem relação com o planejamento setorial e a necessidade efetiva.

Por isso, é crítico para o sucesso da transição energética brasileira, em adição à implementação dos marcos legais acima citados, que o setor elétrico seja também foco de reforma e modernização, com vistas a solucionar as distorções e vulnerabilidades existentes.

É importante citar que, além dos novos marcos legais aprovados, tem havido relevantes avanços também no âmbito infralegal.

Um exemplo óbvio é o Programa Energias da Amazônia, criado pelo Decreto Federal nº 11.648, em 2023 (Brasil, 2023a). Essa política veio integrar e sinergizar um amplo conjunto de medidas para superar a forte dependência e ineficiência de geração a diesel para atendimento aos sistemas isolados da região amazônica. O programa já orientou obrigações mínimas de renováveis em leilão para contratação de soluções de suprimento elétrico para localidades na região, bem como um edital de mais de R$ 350 milhões a fundo perdido para impulsionar projetos destinados à redução do uso de diesel, dos seus altos custos e emissões associados.

Mais um exemplo relevante foi a criação, em 2024, da Plataforma Brasil de Investimentos Climáticos e para a Transformação Ecológica (BIP) (Brasil, 2024g), lançada durante a Semana do Clima de Nova Iorque. A BIP é uma iniciativa conjunta do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e dos Ministérios da Fazenda, de Minas e Energia, do Meio Ambiente e Mudança do Clima e do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços, com objetivo de facilitar os esforços de financiamento de relevantes projetos alinhados aos planos climáticos, de transição energética e industrialização verde do País. A plataforma serve como acelerador e *hub* para combinar diversas fontes de financiamento aos projetos que estão na fronteira da transição energética, com adoção de tecnologias pioneiras e avançando sobre mercados ainda incipientes. Entre os projetos já enquadrados, estão os de fertilizantes verdes, aço verde, combustíveis sustentáveis de aviação, minerais para a transição energética, entre outros.

Para fechar esse conjunto de exemplos de políticas para a transição energética em âmbito infralegal, é difícil não mencionar a implementação de um ambicioso planejamento de expansão da infraestrutura de transmissão de energia elétrica para integração de fontes renováveis, sobretudo eólica e solar, abrangendo principalmente a Região Nordeste do País. Em 2023 e 2024, foram contratados, em quatro leilões de transmissão, quase R$ 60 bilhões em investimentos. Isso representa, em média anual, mais de três vezes o ritmo de investimentos no período de 2010 a 2015, e 40% superior à média de 2016 a 2020.

4. Transição energética como agenda transversal e integrada à política climática

Como fica evidente que esses avanços não são iniciativas isoladas, mas, sim, são resultados de uma agenda transversal que perpassa, para além da política energética, as políticas externa, econômica, social, ambiental, climática, industrial, tecnológica, de comércio e, até mesmo, de saúde, entre outras. Um levantamento referente ao período de 2023 a 2025 revela os principais elementos dessa estratégia integrada que tem na transição energética um pilar essencial:

- Plano Plurianual (PPA) da União 2024-2027 (Lei nº 14.802/2024) (Brasil, 2024h): tem como um de seus três eixos o "desenvolvimento econômico e sustentabilidade socioambiental e climática", que se desdobra em diretrizes e programas que, a todo momento, incluem a transição energética como aspecto fundamental, além de possuir programa específico para transição energética (Programa 3107 do Anexo III – Programas Finalísticos).
- Novo PAC, apresentado em 2023 (Brasil, 2023b): tem como um dos eixos de investimentos "transição e segurança energética", desdobrando-se em diversos subeixos.
- Plano Clima, cuja elaboração foi determinada pelo Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima (CIM) em 2023 (Brasil, 2023c): possui estratégias nacionais de mitigação e de adaptação, além de uma estratégia transversal, a partir das quais são definidos planos setoriais de energia.
- Nova Indústria Brasil (NIB) (Brasil, 2024i): política industrial lançada em janeiro de 2024, baseada em seis missões principais, sendo uma delas "Bioeconomia, descarbonização e transição e segurança energéticas".
- Plano de Transformação Ecológica (Brasil, 2025c): estabelece uma visão de desenvolvimento socioeconômico do País pautada em elevados padrões de sustentabilidade, incluindo o eixo "transição energética" (Brasil, 2023d).
- Estratégia Brasil 2050 (Brasil, 2025d): busca garantir maior previsibilidade na atuação governamental e tem como um dos seus estudos temáticos o tema transição e segurança energética.

No campo da política energética, por sua vez, citamos a aprovação, em 2024, pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), da Política Nacional de Transição Energética (PNTE) (Brasil, 2024j), com um conjunto de diretrizes e o estabelecimento de dois novos instrumentos fundamentais:

- O Plano Nacional de Transição Energética (Plante) (Brasil, 2024k) estabelece um conjunto de ações de longo prazo, visando à neutralidade de emissões e ao desenvolvimento econômico sustentável.

- O Fórum Nacional de Transição Energética (Fonte) (Brasil, 2025e) atua como um espaço de diálogo entre representantes de governo, sociedade civil e setor produtivo, com vistas a uma transição justa e inclusiva, e que teve sua composição finalmente aprovada em junho de 2025.

Apesar de todos esses esforços, há ainda muito a se fazer. No entanto, o nosso País isoladamente não terá sucesso no combate às mudanças climáticas. É necessário que o restante do mundo esteja também comprometido nesse processo, sob pena de uma alocação injusta dos custos da descarbonização, sobrecarregando o Brasil.

A COP30 no Brasil coincide com o marco de 10 anos desde o Acordo de Paris – ocorrido em 2015, na COP21. Foi com base nesse acordo que a maioria dos países do mundo apresentou compromissos voluntários de redução de emissões, conhecidos como Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) [do Inglês, *Nationally Determined Contributions*]. À medida que o tempo avança, os países devem atualizar suas NDC, para ampliar o horizonte temporal de suas metas voluntárias, sempre aumentando a ambição. Nesse sentido, até a COP30, são esperadas as novas NDC dos países ampliando o horizonte de 2030 para 2035, cujos níveis de ambição são incertos e podem variar bastante.

O governo brasileiro já apresentou sua nova meta climática nacional à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCC) [do Inglês, *United Nations Framework Convention on Climate Change*], em novembro de 2024, no início da COP29 em Baku, Azerbaijão. Para 2035, o Brasil adotou uma NDC na forma de uma banda, com compromisso de reduzir as emissões líquidas de gases de efeito estufa no País de 59% a 67% até 2035, em comparação aos níveis de 2005 – o que equivale a alcançar entre 850 milhões e 1,05 bilhão de toneladas de CO_2 equivalente. Para 2030, o compromisso de redução mantém-se em 53%, também em relação a 2005.

Trata-se de um desafio enorme para todos os setores emissores, inclusive para o setor energético e os setores consumidores de energia. Embora, de acordo com dados do Sistema de Registro Nacional de Emissões (Sirene), vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), as emissões do setor de energia tenham representado apenas 20,5% do total de emissões no Brasil em 2022, a redução das emissões associadas à produção e ao consumo de energia deverá ser parte importante no alcance da meta brasileira até 2035.

Apesar de todas as políticas para a transição energética vigentes e anunciadas, a pressão atual vai na direção contrária, como indica o Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 (EPE, 2025b) colocado em consulta pública pelo MME em 2024 e aprovado em abril de 2025. O estudo desse plano aponta, para o cenário de referência, um crescimento das emissões desse setor de 458 MtCO2eq em 2024 para 543 MtCO2eq em 2034, ou seja, de 18,5% em 10 anos.

5. Atuação do Brasil no campo internacional e o caminho para a COP30

A presidência do Grupo dos Vinte (G20) pelo Brasil em 2024, o seu *status* de anfitrião da *Clean Energy Ministerial e Mission Innovation* também em 2024, a presidência dos Brics[3] em 2025 e, finalmente, a presidência da COP30 e sua realização no Brasil, neste mesmo ano, determinam um biênio extraordinariamente favorável ao protagonismo do Brasil nas relações internacionais. Apesar do contexto geopolítico complexo, a atuação do Brasil na transição energética tem ajudado a moldar consensos nessa agenda.

É digno de nota o resultado alcançado pelo País, em 2024, no Grupo de Trabalho sobre Transições Energéticas (ETWG) [do Inglês, *Energy Transition Working Group*] do G20, com a aprovação de um texto contendo 10 princípios para uma transição energética justa e inclusiva, incorporando a perspectiva e os desafios de grandes países em desenvolvimento. Outro avanço impulsionado pela liderança brasileira tem sido o reconhecimento do papel central dos combustíveis sustentáveis, inclusive os bicombustíveis, para a transição energética e a necessidade de buscar harmonização de padrões e certificações para escalar seu uso.

Ainda no contexto da presidência brasileira no G20, houve apoio para esforços de fortalecimento de capacidades institucionais em planejamento energético, com foco na redução do custo de capital e no aumento do financiamento para a transição energética, especialmente em países em desenvolvimento. Desse debate nasceu a Coalizão Global para o Planejamento Energético (GCEP) [do Inglês, *Global Coalition for Energy Planning*], que ganha, cada vez, mais apoio e teve a realização no Rio de Janeiro, em junho de 2025, do seu primeiro grande encontro (1st *Energy Planning Summit*).

Já para a COP30, o seu presidente, o embaixador André Corrêa do Lago, lançou o chamado "mutirão" de ação climática, unindo os esforços para que Belém seja uma "COP de soluções", inspirando todos, a partir do exemplo de políticas, projetos, medidas que possam ser replicadas em escala global e adaptadas para cada circunstância e contexto regional e local. Na prática, esse chamado significa uma busca para que as negociações pelas delegações dos países sejam correspondidas por um esforço ainda maior de implementação e resultados concretos, a partir da mobilização da sociedade civil e do setor privado.

No âmbito da COP30, o sucesso será medido a partir do avanço das medidas necessárias apontadas no Balanço Geral do Acordo de Paris (GST) [do Inglês, *Global Stocktake*], negociado e aprovado

3 O Brics é um agrupamento formado por onze países membros: Brasil, Rússia, Índia, China, África do Sul, Arábia Saudita, Egito, Emirados Árabes Unidos, Etiópia, Indonésia e Irã. Serve como foro de articulação político-diplomática de países do Sul Global e de cooperação nas mais diversas áreas.

na COP28 em Dubai. Esse documento traz, nos parágrafos 27 a 30, importantes diretrizes para os esforços de transição energética para uma economia de baixo carbono, entre os quais abandonar progressivamente os combustíveis fósseis nos sistemas energéticos, de forma justa, ordenada e equitativa, acelerando as ações nesta década crítica, de modo a atingir a emissão líquida zero até 2050, em consonância com a ciência.

O documento reconhece, além de diversos outros aspectos, que os combustíveis de transição podem desempenhar papel na facilitação da transição energética, garantindo, ao mesmo tempo, a segurança energética, enquanto aponta o avanço, ao longo da última década, das tecnologias de baixo carbono, tornando-se cada vez mais disponíveis e competitivas, graças aos avanços tecnológicos, às economias de escala, ao aumento da eficiência e à racionalização dos processos industriais.

No entanto, tal como no caso brasileiro descrito resumidamente neste artigo, cada país enfrenta seus dilemas e desafios na ação climática e na transição energética, ainda mais os países em desenvolvimento. Essas questões traduzem-se em limitações fiscais, custo de capital elevado, necessidade de ampliar o acesso à energia e gerir o impacto socioeconômico da inflação energética, dependência de receitas e arrecadação da indústria de combustíveis fósseis, no caso dos países produtores, além de acesso a financiamento, transferência de tecnologia, barreiras comerciais, entre outros.

Esse contexto é importante para entender por que a COP30, em Belém, terá prioridade nas negociações relativas ao Diálogo dos Emirados Árabes Unidos (EAU) sobre a implementação dos resultados do GST e sobre o Programa de Trabalho para uma Transição Justa (JTWP) [do Inglês, *Just Transition Work Programme*). São frentes que devem abordar as lacunas de financiamento climático e outros meios de implementação, bem como a necessidade de levar em consideração a participação social, a proteção aos trabalhadores e às populações tradicionais e indígenas, a equidade de gênero, a erradicação da pobreza, entre outros. A agenda de adaptação climática compõe outra vertente prioritária e cada vez mais urgente.

6. Conclusão

O combate às mudanças climáticas depende centralmente de uma atitude cooperativa entre os países, de somar os esforço conjuntamente para reduzir emissões de gases de efeito estufa. Este ano, na COP30, será um momento crucial para verificar o nível de compromisso e ambição dos países a partir da apresentação de suas NDC. O Brasil tem apresentado credenciais sólidas para se colocar como um dos líderes do processo, tanto pela robustez dos compromissos assumidos,

lastreados em planejamentos setoriais críveis, quanto pelo desdobramento desses planos em políticas públicas e mobilização do setor privado.

O processo de transição energética é um dos pontos sensíveis dessa equação e das cenarizações. Tanto pelo fato de ser responsável pela maior parte da emissões dos países desenvolvidos, como por impactar a maior parte das atividades econômicas dos países. O Brasil, por possuir uma matriz energética mais limpa, tem credenciais tanto para liderar, quanto para influenciar positivamente mudanças rumo a economias de baixa emissão.

A cooperação internacional é indispensável para a superação desses colossais desafios para uma transição justa e inclusiva. O Brasil, com seus bons exemplos, e diante de suas próprias dificuldades, tem legitimidade, repertório e competência para exercer papel de liderança na COP30, sabendo que o resultado desse esforço terá profundos impactos na nossa trajetória efetiva, que pode ser concretizada com maior ou menor semelhança aos cenários do Plano Nacional de Energia 2055 (EPE, 2025a).

Referências

BRASIL. Casa Civil. **Novo PAC** – Transição e segurança energética**.** 2023b. Disponível em: *https://www.gov.br/casa civil/pt_br/novopac/transicao-e-seguranca-energetica*

BRASIL. Ministério da Fazenda – MF. **Nova Indústria Brasil – NIB**. 2024i. Disponível em: *https://www.gov.br/fazenda/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/transformacao-ecologica/programas-em-destaque/nova-industria-brasil*

BRASIL. Ministério da Fazenda – MF. **Plano de Transformação Ecológica**. 2025c. Disponível em: *https://www.gov.br/fazenda/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/transformacao-ecologica-novo-brasil/cartilha/cartilha-novo-brasil*

BRASIL. Ministério da Fazenda – MF. **Plataforma Brasil de investimentos climáticos e para a transformação ecológica – BIP.** 2024g. Disponível em: *https://www.gov.br/fazenda/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/transformacao-ecologica/bip*

BRASIL. Ministério de Minas e Energia – MME. **Fórum Nacional de Transição Energética – Fonte.** 2025e. Disponível em: *https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/dte/cgate/fonte*

BRASIL. Ministério de Minas e Energia – MME. **Plano Nacional de Transição Energética – PLANTE**. 2023k. Disponível em: *https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/dte/cgate/plante*

BRASIL. Ministério de Minas e Energia – MME. **Política Nacional de Transição Energética (PNTE).** 2024j. Disponível em: *https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/dte/cgate/pnte*

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima – CIM.** 2023c. Disponível em: *https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smc/dgov/cim*

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços – MDIC. **Resolução CNDI/MDIC nº 1, de 6 de julho de 2023.** Propõe a nova política industrial, com a finalidade de nortear as ações do Estado Brasileiro em favor do desenvolvimento industrial. 2023d. Disponível em: *https://www.gov.br/mdic/pt-br/composicao/se/cndi/arquivos/decretos-e-portarias/arquivos/dou_2023-07-20-resolucao-cndi-mdic-no-1-de-6-de-julho-de-2023-missoes-republicacao/view*

BRASIL. Ministério do Planejamento e Orçamento – MPO. **Estratégia Brasil 2050.** 2025d. Disponível em: *https://www.gov.br/planejamento/pt-br/assuntos/planejamento/Brasil2050*

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 11.648, de 16 de agosto de 2023.** Institui o Programa Energias da Amazônia. 2023a. Disponível em: *https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/decreto/d11648.htm*

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 14.802, de 10 de janeiro de 2024.** Institui o Plano Plurianual da União para o período de 2024 a 2027. 2024h. Disponível em: *https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14802.htm*

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 14.902, de 27 de junho de 2024.** Institui o Programa Mobilidade Verde e Inovação (Programa Mover). 2024e. Disponível em: *https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14902.htm*

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024.** Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono; dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono; institui incentivos para a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono; institui o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro); cria o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC). 2024a. Disponível em: *https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14948.htm*

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 14.990, de 27 de setembro de 2024.** Institui o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC). 2024b. Disponível em: *https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14990.htm*

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024.** Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono; institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano. 2024c. Disponível em: *https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=14993&ano=2024&ato=bf3MTUE9ENZpWT978*

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 14.995, de 10 de outubro de 2024**. Institui o Programa Acredita no Primeiro Passo e o Programa de Mobilização de Capital Privado Externo e Proteção

Cambial - Programa Eco Invest Brasil. 2024f. Disponível em: *https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=14995&ano=2024&ato=587kXVE9ENZpWT72d*

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024**. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). 2024.d *https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=15042&ano=2024&ato=997QTQE1UNZpWTb27#:~:text=Institui%200%20Sistema%20Brasileiro%20de,de%201973%20*(Lei%20de%20RegistrosDisponível em:

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 15.097, de 10 de janeiro de 2025.** Disciplina o aproveitamento de potencial energético offshore. 2025a. Disponível em: *https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/lei/l15097.htm*

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 15.103, de 22 de janeiro de 2025.** Institui o Programa de Aceleração da Transição Energética (Paten). 2025b. Disponível em: *https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/lei/l15103.htm*

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS – EPE. **Cenários energéticos:** Plano Nacional de Energia 2055. Rio de Janeiro: MME; EPE, 2025a. Disponível em: *https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-nacional-de-energia/plano-nacional-de-energia-2055/cadernos/pne-2055_caderno-cenarios-energeticos-090125_completo.pdf/@@download/file*

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS – EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034.** Rio de Janeiro: MME; EPE, 2025b. Disponível em: *https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034*

Mudanças do clima: a contribuição do MCTI para as políticas nacionais e para os compromissos internacionais do Brasil

Osvaldo Luiz Leal de Moraes[1], *Andrea Latge*[2], *Ima Celia Guimarães Vieira*[3], *Márcio Rojas*[4]

Resumo

A mitigação e a adaptação às mudanças climáticas impõem um conjunto de ações, políticas e acordos internacionais e definem uma agenda climática. Essa agenda engloba metas, planos e estratégias que demandam parecerias estratégicas. Neste artigo serão apresentadas as contribuições do Ministério de Ciência Tecnologia e Inovação (MCTI) que orientam as políticas setoriais do Brasil e servem como guias para parcerias que buscam orientação da ciência.

Abstract

Mitigation and adaptation to climate change require a set of actions, policies, and international agreements that define a climate agenda. This agenda includes goals, plans, and strategies that require strategic partnerships. This article presents the contributions of the Ministry of Science, Technology, and Innovations, which guide Brazil's sectoral policies and serve as guidelines for partnerships seeking scientific guidance.

1 Físico com doutorado em Ciências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). É diretor do Departamento para o Clima e Sustentabilidade do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Coordena o Comitê Permanente da Organização Meteorológica Mundial (OMM) para Redução de Riscos de Desastres.

2 Física, com doutorado em Física pela Universidade Federal Fluminense (UFF). É secretária de Políticas e Programas Temáticos do MCTI. Foi pró-reitora de pesquisa, pós-graduação e inovação da UFF. Membro titular da Academia Brasileira de Ciências (ABC).

3 Agrônoma, com doutorado em Ecologia pela *University of Stirling*, Escócia. É membro titular da ABC e, atualmente, exerce o cargo de assessora da presidência da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep).

4 Doutor em Bioética (2011) pela Universidade de Brasília (UnB), analista em ciência e tecnologia do MCTI (desde 2003), onde é coordenador-geral de Ciência do Clima (desde 2014). Participou dos processos de negociação internacional que resultaram na Declaração Universal sobre Bioética e Direitos Humanos da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (Unesco) e no Acordo de Paris, sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC).

Palavras-chaves: Mudanças climáticas. IPCC. UNFCC. Comunicação nacional. Inventário nacional de gases de efeito estufa.

Keywords: *Climate Change. IPCC. UNFCC. National Communication. National Greenhouse Gas Inventory.*

1. Introdução

A Agenda Climática refere-se ao conjunto de metas, estratégias e ações definidas para combater as mudanças climáticas e seus impactos, incluindo a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a adaptação aos efeitos já sentidos ou esperados. Nesse sentido, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) desempenha papel crucial nessa agenda, contribuindo com a indução de pesquisas, desenvolvimento de ferramentas e orientando políticas públicas para a adaptação e a mitigação dos impactos das mudanças climáticas. O MCTI atua em diversas frentes, desde a elaboração de inventários de emissões de gases de efeito estufa até o desenvolvimento de plataformas e sistemas de monitoramento para a tomada de decisões. O MCTI atua na orientação científica das ações de adaptação, com foco na incorporação de conhecimentos tradicionais e no desenvolvimento de tecnologias para energias renováveis e cidades sustentáveis.

Além disso, o ministério coordena um ecossistema científico de excelência mundial. Nossos institutos de pesquisa formam uma rede integrada que reúne expertises em diversas áreas da ciência ambiental e climática, que articuladas com as agências de fomento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), criam uma estrutura que produz conhecimento fundamental para compreender e enfrentar as mudanças globais. Essa capacidade científica transcende o âmbito acadêmico e materializa-se em dados concretos que orientam políticas públicas nacionais e compromissos internacionais assumidos pelo País.

Vale salientar que lideramos projetos científicos únicos no planeta que são referência mundial. O Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA) investiga, há mais de três décadas, como a Amazônia interage com o clima global, produzindo conhecimento fundamental sobre os processos que controlam o funcionamento da maior floresta tropical do mundo. O AmazonFACE é o único experimento mundial que estuda como florestas tropicais respondem ao aumento das concentrações de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, fornecendo dados essenciais para modelos climáticos globais e projeções futuras. A Torre ATTO, com impressionantes 325 metros de altura, monitora continuamente as trocas de gases entre a floresta amazônica e a atmosfera, alimentando modelos climáticos globais com informações cruciais para projeções e tomada de decisões políticas.

Nossa ciência vai muito além de simplesmente reduzir emissões e abrange todo o espectro da agenda climática. O programa ADAPTA Brasil desenvolve soluções baseadas em evidências científicas para aumentar a resiliência dos sistemas naturais e humanos às mudanças climáticas já em curso. O Cemaden opera uma rede nacional abrangente de estações meteorológicas, hidrológicas e geotécnicas que fornecem dados essenciais para sistemas de alerta precoce, protegendo vidas e reduzindo danos causados por desastres naturais. O projeto Regenera Brasil alinha-se diretamente com nossa Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) [do Inglês, *Nationally Determined Contributions*], representando uma iniciativa técnico-científica inovadora para recuperação da vegetação nativa, por meio de projetos-piloto estratégicos na Amazônia e na Mata Atlântica.

Neste artigo, faremos breve descrição de como a nossa atuação ocorre e como ela se desenha quando se pensa em parcerias estratégicas.

2. Agenda Climática

Jean-Baptiste Fourier – matemático e físico francês, nascido há aproximadamente 260 anos, conhecido pela teoria da transferência de calor assim como, também, pela Série de Fourier – foi a primeira pessoa a estudar a temperatura da Terra sob uma perspectiva matemática. Ele examinou as variações de temperatura entre o dia e a noite, e entre o verão e o inverno, e concluiu que o planeta era muito mais quente do que uma simples análise poderia sugerir. Seus cálculos indicaram que a Terra deveria, na verdade, ser muito mais fria (*-18°C* ou *0°F*). Ele concluiu que deveria haver algum tipo de equilíbrio entre a energia que entra e a que sai para manter essa temperatura razoavelmente constante. Sua ideia de que a atmosfera da Terra atua como um isolante é a primeira formulação do que hoje chamamos de efeito estufa (Fourier, 1824). No entanto, ele não utilizou esse termo, que apareceu pela primeira vez no trabalho do meteorologista sueco Nils Gustaf Ekholm por volta de 1900.

Já o irlandês John Tyndall, em meados do século 19, conduziu uma série de experimentos para medir com precisão como a radiação infravermelha é absorvida pelos gases. Ele testou diversos gases e vapores e descobriu que, embora elementos puros, como oxigênio e nitrogênio, tenham pouco efeito, moléculas mais complexas absorvem fortemente o calor. Tyndall demonstrou que o vapor da água, o dióxido de carbono e o ozônio absorvem fortemente a radiação térmica. Ele especulou como as mudanças no vapor da água e no dióxido de carbono estão relacionadas às mudanças climáticas. Ele percebeu que o efeito mais forte era o do vapor da água, sem o qual "a superfície da Terra seria mantida sob as garras férreas da geada", nas suas palavras (Tyndall, 1861).

Fourier e Tyndall, embora possam ser considerados precursores do efeito estufa, não foram os autores do artigo relacionado ao nascimento da ciência das mudanças climáticas, publicado

em 1896. O sueco Svante Arrhenius foi o primeiro a sugerir que as concentrações de dióxido de carbono na atmosfera poderiam afetar o clima da Terra por meio do efeito estufa. Ele publicou suas ideias no periódico sueco *Behang till Kongliga Vetenskaps-Akademiens Handlingar* (Arrhenius, 1896) e em uma versão resumida em inglês no *Philosophical Magazine* (Arrhenius, 1986). No artigo, ele não discutiu o efeito da queima de combustíveis fósseis nas emissões de dióxido de carbono. No entanto, ele o fez em *Worlds in the Making* (Arrhenius, 1908). Nesse livro, ele discutiu o papel da atividade humana e do vulcanismo nas emissões de dióxido de carbono e declarou que os principais meios de remoção de dióxido de carbono a longo prazo eram a formação de minerais carbonáticos e a produção de turfa pelas plantas. É interessante considerar que nesse livro ele argumenta que um aumento do efeito estufa, devido à atividade humana, seria algo positivo, prevenindo uma nova Era Glacial e permitindo melhores colheitas.

Ao longo das décadas seguintes, houve muitos trabalhos publicados relacionando CO_2 e temperatura do planeta. Contudo, foi na década de 50 que muitos cientistas argumentaram que as emissões de dióxido de carbono poderiam ser um problema, com alguns projetando em 1959 que o CO_2 aumentaria 25% até o ano 2000, com efeitos potencialmente danosos no clima (Franta, 2018; Weart, 2023).

Outro momento relevante na ciência das mudanças climáticas decorre das descobertas de Charles Keeling, em 1960, que, por meio do registro de dióxido de carbono no Observatório Mauna Loa, confirmou a proposição de Arrhenius. A partir desse momento, a preocupação aumentou ano a ano, juntamente com o aumento da Curva de Keeling do CO_2 atmosférico (Figura 1).

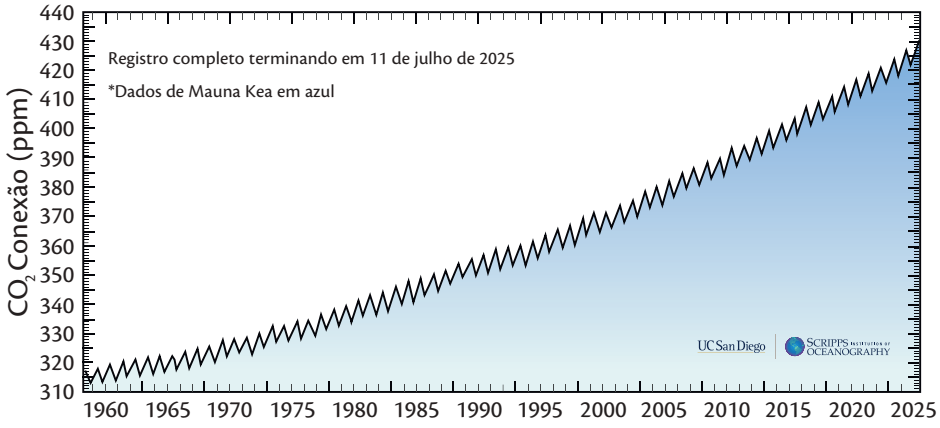


Figura 1. Curva Keeling - Concentração de dióxido de carbono no Observatório de Mauna Loa*

Obs.: Registro diário da concentração global de dióxido de carbono na atmosfera mostrado em Mauna Loa, uma ilha no Pacífico. Na figura acima, estão os dados registrados até o dia 11 de julho de 2025. Naquele dia, a concentração foi de 427,25 ppm.

Fonte: Monroe (2025).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) [do Inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change*] foi criado em 1988 para fornecer aos formuladores de políticas avaliações científicas regulares sobre o estado atual do conhecimento sobre mudanças climáticas (IPCC, 2025). A criação do IPCC foi endossada pela Assembleia-Geral da Organização das Nações Unidas (ONU) em 1988. Sua tarefa inicial era preparar uma revisão abrangente e recomendações com relação ao estado do conhecimento da ciência das mudanças climáticas bem como avaliar o impacto social e econômico das mudanças climáticas e, também, as potenciais estratégias de resposta e elementos para inclusão em uma possível futura convenção internacional sobre o clima. Desde 1988, o IPCC realizou seis ciclos de avaliação e emitiu seis relatórios de avaliação – os relatórios científicos mais abrangentes sobre mudanças climáticas já produzidos em todo o mundo. Também produziu uma série de relatórios de metodologia, relatórios especiais e documentos técnicos, em resposta a solicitações de informações sobre questões científicas e técnicas específicas da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCC) [do Inglês, *United Nations Framework Convention on Climate Change*], dos governos e das organizações internacionais (IPCC, 2025). Estima-se que mais de 8 mil cientistas de 195 países tenham contribuído para os relatórios do IPCC ao longo dos anos.

Essa convenção entrou em vigor em 1994 e estabelece um arcabouço geral para os esforços intergovernamentais, a fim de enfrentar o desafio imposto pelas mudanças climáticas (UNFCCC, 2006). Conforme a convenção, todas as Partes devem relatar, por meio de Comunicações Nacionais (NC) [do Inglês, *National Communications*], informações sobre as emissões por fontes e remoções por sumidouros de todos os gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal (inventários de gases de efeito estufa). As comunicações devem descrever, ainda, os programas nacionais relacionados às medidas para mitigar e facilitar a adaptação adequada às mudanças climáticas.

Finalmente, nesta resenha, não podemos deixar de citar a COP 21, realizada em Paris – acordo alcançado para combater as mudanças climáticas e acelerar e intensificar as ações –, e os investimentos necessários para limitar o aumento de temperatura. O acordo (UN, 2015) exige que todas as Partes apresentem as suas Contribuições Nacionalmente Determinadas. Alguns dos principais aspectos do Acordo podem ser sumarizados em alguns dos seus artigos, como o artigo 2 que, especificamente, reafirma a meta de limitar o aumento da temperatura global bem abaixo de 2 graus *Celsius*, enquanto busca esforços para limitar o aumento a 1,5 grau. Já o artigo 4 vincula a meta anterior em que as Partes se comprometem a contribuir para que o pico global de concentração seja alcançado o mais breve possível para o equilíbrio entre as emissões antrópicas por fontes e as remoções por sumidouros de GEE na segunda metade do século.

Não menos importantes são os artigos 9, 10 e 11, que tratam do apoio financeiro, tecnológico e de capacitação. Conforme esses artigos, o Acordo de Paris reafirma as obrigações dos países

desenvolvidos que devem apoiar os esforços dos países em desenvolvimento para construir futuros limpos e resilientes ao clima.

Para resumir, o Acordo de Paris pode ser interpretado como referência da Agenda do Clima, necessária e urgente. No próximo tópico, iremos abordar a urgência para prosperar nessa agenda com foco no IPCC.

3. Urgência para avançar na agenda – uma síntese do último relatório do IPCC

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) apresentou, em 2023, Sexto Relatório de Avaliação (AR6) [do Inglês, *Sexto Relatório de Avaliação*] (IPCC, 2023). Este relatório, com 8 mil páginas, é o estudo mais abrangente e ambicioso já realizado pelo órgão intergovernamental e foi o alerta mais severo até aquele momento. O relatório foi produzido por três grupos de trabalho distintos: o Grupo de Trabalho I avaliou a base física das mudanças climáticas; o Grupo de Trabalho II avaliou o impacto, a adaptação e a vulnerabilidade das mudanças climáticas; e o Grupo de Trabalho III abordou a mitigação das mudanças climáticas.

Alguns dos seus principais resultados podem ser sumarizados no que segue.

As mudanças climáticas em curso são o resultado de atividades humanas e constituem uma ameaça aos sistemas humanos e naturais. O *Sexto Relatório* afirma que tais mudanças são consequência de mais de um século de emissões líquidas de GEE provenientes do uso de energia, do uso da terra e das mudanças no uso da terra, do estilo de vida e dos padrões de consumo, e da produção. **As temperaturas globais estão subindo, as geleiras estão derretendo e o nível do mar está subindo**. A temperatura média global aumentou desde a era pré-industrial e a projeção é de que continue subindo nas próximas décadas. À medida que o clima esquenta, os padrões de precipitação mudam, a evaporação aumenta, as geleiras derretem e o nível do mar sobe. A temperatura da superfície global aumentou mais rapidamente desde 1970 do que em qualquer outro período, pelo menos nos últimos 2.000 anos. A variação provável do aumento total da temperatura da superfície global causado pelo homem entre 1850-1900 e 2010-2019 é entre 0,8°C e 1,3°C. **A frequência e a intensidade de eventos climáticos extremos estão aumentando**. Esses eventos são capazes de causar enormes perdas de vidas e propriedades. A comunidade científica concorda unanimemente que o aquecimento global está exacerbando a intensidade desses eventos, pois aumenta a evaporação das águas superficiais para a atmosfera, afetando os padrões de chuva em todo o mundo. Mais da metade da população global já enfrenta grave escassez de água por, pelo menos, um mês por ano e, até 2050, as secas poderão afetar até dois

terços da população mundial. **A acidificação dos oceanos está acelerando, a biodiversidade está diminuindo e a água está tornando-se cada vez mais escassa.** A acidificação dos oceanos aumentou 30% desde a era pré-industrial e espera-se que continue aumentando no futuro. Esse aumento acentuado da acidez tem impactos devastadores nos ecossistemas marinhos, levando à diminuição da biodiversidade e ao colapso da pesca. A biodiversidade está diminuindo devido à destruição de *habitats*. Estima-se que a taxa de extinção de espécies seja de 100 a 1.000 vezes maior do que antes da industrialização. Se o aquecimento global atingir 4°C, as descobertas do AR6 sugerem que cerca de 4 bilhões de pessoas deverão sofrer escassez de água. As mudanças climáticas estão exacerbando as desigualdades existentes, visto que comunidades vulneráveis e países em desenvolvimento são desproporcionalmente impactados por seus efeitos. Por exemplo, aqueles que vivem na pobreza têm maior probabilidade de serem afetados por eventos climáticos extremos, como inundações e secas, devido à falta de acesso a recursos, serviços de saúde e infraestrutura adequada. Apesar de sua contribuição quase insignificante para as emissões globais de gases de efeito estufa, as famílias com renda entre os 50% mais baixos já estão sendo desproporcionalmente afetadas pelos efeitos das mudanças climáticas e continuarão a ser as mais impactadas no futuro. Além disso, aqueles que vivem em áreas costeiras baixas têm maior probabilidade de serem afetados pela elevação do nível do mar. **A economia global é vulnerável aos impactos das mudanças climáticas.** A destruição causada por eventos climáticos extremos, como inundações e secas, resulta em perdas econômicas inimagináveis. Além disso, esses eventos podem interromper as cadeias de suprimentos globais, levando a enormes perdas econômicas. Se as temperaturas aumentarem na trajetória atual, e o Acordo de Paris e as metas de emissão líquida zero para 2050 não forem cumpridos, o mundo poderá correr o risco de perder cerca de 10% do valor econômico total devido às mudanças climáticas. Se as emissões de gases de efeito estufa não forem controladas – com riscos de aumento da temperatura média global ultrapassar 3°C, poderemos ver até 18% do produto interno bruto (PIB) global corroído até meados do século.

Contudo, o AR6 possibilitou ter esperança ao afirmar que possuímos opções, em todos os setores, para reduzir as emissões pela metade, pelo menos, até 2030. No lançamento do relatório, o então copresidente do Grupo de Trabalho III afirmou que "*Having the right policies, infrastructure and technology in place to enable changes to our lifestyles and behaviour can result in a 40-70% reduction in greenhouse gas emissions by 2050*".[5]

Nada mais apropriado, além das mensagens do AR6, para acelerar a Agenda Climática como o relatório *State of the Global Climate 2024* (WMO, 2025) da Organização Meteorológica Mundial (OMM). Anualmente, essa agência da ONU publica relatórios que avaliam como foi o clima global no ano anterior ao que o relatório é publicado. O relatório mostrou que a temperatura média

5 Tradução livre: "*Ter as políticas, a infraestrutura e a tecnologia certas para permitir mudanças em nossos estilos de vida e comportamento pode resultar em uma redução de 40% a 70% nas emissões de gases de efeito estufa até 2050*".

global, próxima à superfície, em 2024, foi de 1,55 °C ± 0,13 °C acima da média de 1850-1900. O ano de 2024 foi o ano mais quente no registro observacional de 175 anos. Deve-se notar que o ano mais quente anterior havia sido 2023, com uma anomalia de 1,45 °C ± 0,12 °C. Cada um dos últimos 10 anos (2015-2024) foram individualmente os dez anos mais quentes registrados. Seis conjuntos de dados, incluindo duas reanálises, foram usados para avaliar a temperatura global neste relatório conforme mostrado na Figura 2, a seguir.

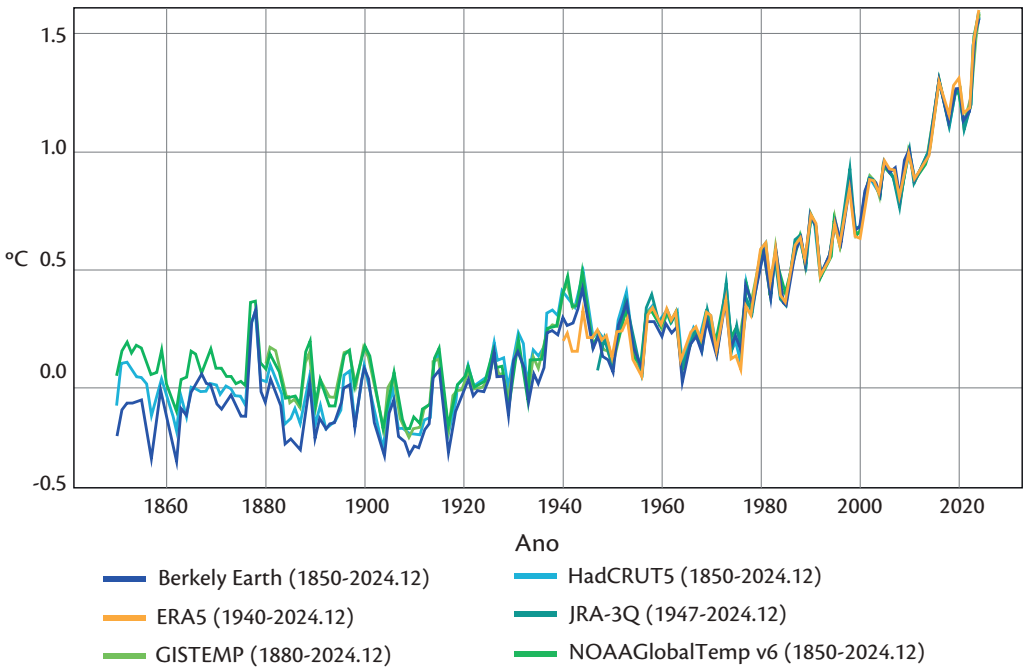


Figura 2. Anomalias anuais da temperatura média global em relação a uma linha de base pré-industrial (1850-1900), mostradas de 1850 a 2024

Fonte: WMO (2025).

4. Contribuição do MCTI para a Agenda Climática

Conforme dito acima, o *Framework* da UNFCCC (2006), no item 1, do artigo 4, que trata dos compromissos das Partes, descreve os 10 compromissos que as Partes assumem. Entre esses 10 compromissos, o MCTI está incluído, direta ou indiretamente, em sete, que brevemente listamos a seguir:

(a) **desenvolver**, atualizar periodicamente, publicar e disponibilizar à Conferência das Partes, de acordo com o artigo 12, inventários nacionais de emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros de todos os gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal, usando metodologias comparáveis a serem acordadas pela Conferência das Partes; (c) **promover e cooperar** no desenvolvimento, na aplicação e na difusão, incluindo transferência de tecnologias, práticas e processos que controlem, reduzam ou previnam emissões antrópicas de gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal em todos os setores relevantes, incluindo os setores de energia, transporte, indústria, agricultura, silvicultura e gestão de resíduos; (e) **cooperar** na preparação para a adaptação aos impactos das alterações climáticas; desenvolver e elaborar planos adequados e integrados para gestão da zona costeira, dos recursos hídricos e da agricultura, e para proteção e reabilitação de áreas afetadas pela seca e pela desertificação, bem como por cheias; (g) **promover e cooperar na investigação científica, tecnológica,** técnica, socioeconômica e outras, na observação sistemática e no desenvolvimento de arquivos de dados relacionados ao sistema climático e destinados a aprofundar a compreensão e a reduzir ou eliminar as incertezas restantes relativamente às causas, aos efeitos, à magnitude e ao calendário das alterações climáticas e às consequências econômicas e sociais das várias estratégias de resposta; (h) **promover e cooperar no intercâmbio completo, aberto e rápido de informações científicas, tecnológicas**, técnicas, socioeconômicas e jurídicas relevantes relacionadas ao sistema climático e às alterações climáticas, e às consequências econômicas e sociais das várias estratégias de resposta; (i) **promover e cooperar na educação,** na formação e na sensibilização pública relacionadas às alterações climáticas e encorajar a mais ampla participação nesse processo, incluindo a de organizações não governamentais (ONG); e (j) **comunicar** à Conferência das Partes informações relacionadas à implementação, de acordo com o artigo 12.

Aqui, é necessário analisar o artigo 12, que trata, especificamente, das Comunicações Nacionais: cada Parte comunicará à Conferência das Partes, por meio do secretariado, os seguintes elementos de informação: i) um inventário nacional de emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros de todos os gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal, usando metodologias comparáveis a serem promovidas e acordadas pela Conferência das Partes; ii) uma descrição geral das medidas tomadas ou previstas pela Parte para implementar a convenção; e iii) qualquer outra informação que a Parte considere relevante para a consecução do objetivo da convenção e adequada para inclusão em sua comunicação, incluindo, se viável, material relevante para cálculos de tendências globais de emissões.

5. Contribuições do MCTI para os compromissos do Brasil perante a UNFCC

Entre os compromissos do Brasil perante a UNFCC, compete ao MCTI a primeira e a última alínea do artigo 4.1, ou seja, as alíneas **a** e **j** supradescritas. Contudo, o MCTI assume, também, papel estratégico nas alíneas **c, e**, **g**, **h** e **i**. A seguir, descrevemos, de forma sucinta, as contribuições do MCTI.

5.1. Comunicações Nacionais

Existem seis componentes principais de uma comunicação nacional: i) as circunstâncias nacionais; ii) o inventário nacional de gases de efeito estufa; iii) os programas contendo medidas para facilitar a adaptação adequada às mudanças climáticas; iv) os programas contendo medidas para mitigar as mudanças climáticas; v) outras informações consideradas relevantes para a consecução dos objetivos da convenção; e vi) as restrições e lacunas, e necessidades financeiras, técnicas e de capacitação. Cada um desses pontos segue um guia metodológico estabelecido pela convenção. Por exemplo, na elaboração do inventário, há dois pontos críticos que devem ser considerados: formulação de mecanismos para coletar e gerenciar dados para a preparação contínua do inventário e formulação de procedimentos para gerenciar incertezas nos dados do inventário e nos cálculos de emissões de GEE. A elaboração das Comunicações Nacionais é um trabalho coletivo, desenvolvido em parceria com diversas instituições e especialistas. Em atenção às diretrizes, já citadas, são apresentados estudos sobre vulnerabilidade e adaptação à mudança do clima, com ênfase para os seguintes setores: agricultura, recursos hídricos, biodiversidade, energias renováveis, desastres naturais de origem hídrica e saúde. As CN contemplam a atualização das ações de mitigação e descrição das medidas adotadas ou previstas para implementar a convenção no País, a cada edição.

O MCTI elaborou, até hoje, quatro CN. A primeira foi estruturada em 2004 (UNFCCC, 2004). Seguiram-se a segunda entregue em 2010 (UNFCCC, 2010), a terceira em 2016 (UNFCCC, 2016) e quarta em 2022 (UNFCCC, 2022). Já a quinta CN será entregue em 2026. A Figura 3, a seguir, ilustra a capa das CN.



Figura 3. Imagens das Capas das Comunicação Nacionais (CN) elaboradas pelo MCTI para a UNFCC

Fonte: Capas das comunicações nacionais feitas pelo MCTI.

5.2. Inventários das emissões de GEE

Esta informação – obrigatória de ser incluída nas CN – é a fonte oficial do país sobre as emissões e as remoções de GEE causadas por atividades humanas. O inventário garante transparência e monitora o progresso dos compromissos das políticas climáticas do País, subsidiando a tomada de decisão. Ele é elaborado em conformidade com as Diretrizes de 2006 do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Isto é relevante, pois a mesma metodologia é seguida por todos os países. Assim, é possível haver comparabilidade. Os inventários são auditados por corpo de especialista, não designados pelo País e, portanto, devem seguir os princípios de transparência, acurácia e consistência. O inventário abrange uma série histórica desde 1990, ano definido internacionalmente como referência para os inventários nacionais de emissões. Seguindo a estrutura de transparência aprimorada do Acordo de Paris, o atual inventário abrange os anos de 1990 a 2022 (Figura 4). O próximo inventário, que deve ser atualizado em 2026, vai cobrir o período 1990 a 2024. O inventário é organizado em cinco setores principais: i) energia; ii) processos industriais e uso de produtos; iii) agropecuária; iv) uso da terra, mudanças do uso da terra e florestas; e v) resíduos. A contribuição relativa, de cada um desses setores, para as emissões, no ano de 2022, está descrita na Figura 5. A emissão líquida, total, em 2022, foi de 2.040 teragramas (Tg) de CO_2 equivalente. Isso representou um aumento de 11,7% em relação às emissões de 2020.

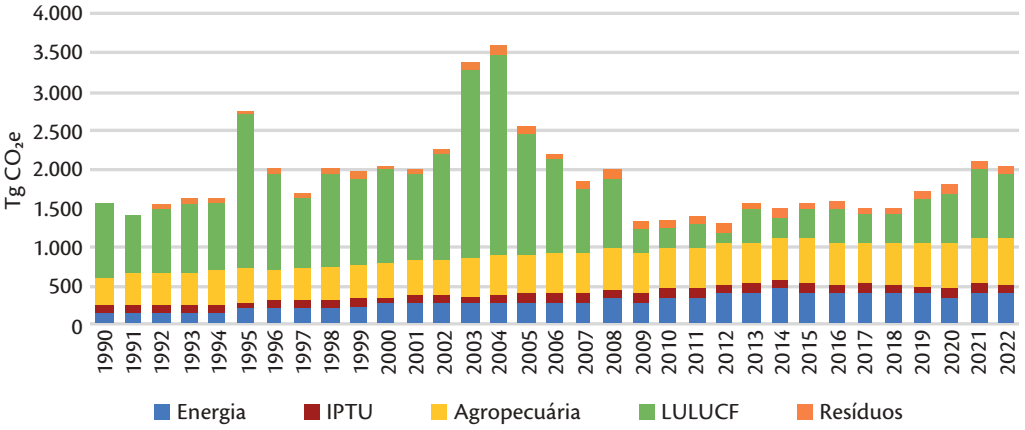


Figura 4. Emissões totais do Brasil (1990-2022) (Tg CO2eq)

Fonte: 1º BTR do Brasil.

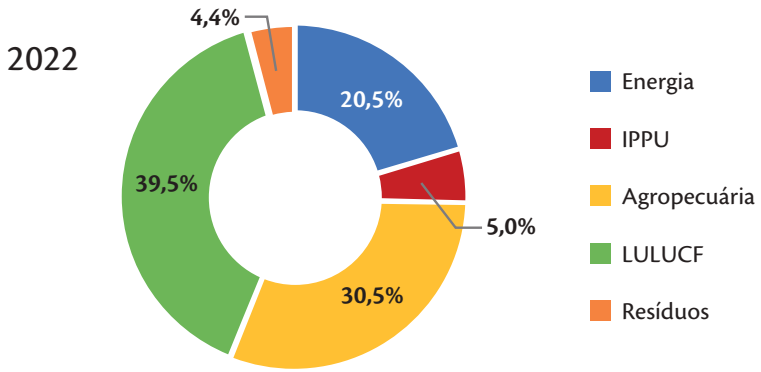


Figura 5. Contribuições relativas, dos setores inventariados, para as emissões totais do Brasil

Fonte: Acordo de Paris.

5.3. Relatórios bienais de transparência

No âmbito do Acordo de Paris e, particularmente, no Quadro de Transparência, as Partes do Acordo são obrigadas a apresentar relatórios bienais de transparência (BTR) [do Inglês, *biennial transparency reports*], a cada dois anos, com a primeira entrega em 31 de dezembro de 2024. Os BTR incluem informações sobre relatórios de inventário nacional, progresso em direção às NDC, políticas e medidas, impactos e adaptação às mudanças climáticas, níveis de apoio financeiro, de desenvolvimento e transferência de tecnologia e de capacitação, necessidades de capacitação e áreas de melhoria.

O Brasil submeteu o Primeiro Relatório Bienal de Transparência em dezembro de 2024 (Brasil, 2024). O documento apresenta um panorama atualizado dos avanços do País na implementação de políticas públicas voltadas para a mitigação e a adaptação à mudança do clima. Ao longo do processo de elaboração e validação, houve a colaboração das pastas ministeriais que integram o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima (CIM), mais alta esfera de governança climática do País, responsável pela aprovação do relatório.

5.4. Plataformas

Além de preparar e elaborar os documentos que o Brasil, obrigatoriamente, tem de entregar à UNFCC, como supradescrito, e no escopo de suporte à tomada de decisão, o MCTI organiza, sistematiza e disponibiliza informações para os tomadores de decisão, sejam eles do setor público, sejam do setor privado, bem como a qualquer cidadão brasileiro, informações *scientific-based*, por meio de plataformas abertas ao público. Tais plataformas são, também, contribuições previstas no artigo 4.1 da UNFCC. As informações incluídas em tais plataformas servem aos propósitos de adaptação e mitigação para uma Agenda do Clima. Todas essas plataformas poder ser acessadas no portal do MCTI.

O Sistema de Registro Nacional de Emissões (Sirene) disponibiliza os resultados do Inventário Nacional de Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal. Este sistema tem por missão conferir a segurança e a transparência ao processo de confecção de inventários de emissões de gases de efeito estufa. Além disso, é ferramenta de suporte à tomada de decisão no âmbito de políticas, planos, programas e projetos na área de mudança do clima – no que tange à geração de conhecimento científico e à adoção de medidas de mitigação.

O Sirene Organizacional é uma iniciativa dedicada a fortalecer a transparência e a sustentabilidade das organizações do país, no que se refere à elaboração e divulgação dos seus inventários de emissões. Os dados setoriais – coletados conforme o protocolo estabelecido pelo IPCC – podem servir para o aprimoramento e a redução das incertezas do inventário nacional. A plataforma é flexível e modular, pois, assim, pode ser rapidamente adaptada para atender às futuras necessidades sobre as regulamentações do tema, seja pela inclusão de novos questionamentos que deverão ser respondidos pelas organizações, seja pela indicação de novas metodologias para contabilização de emissões ou arquivos que comprovem a integridade e confiabilidade dos cálculos.

O Simulador Nacional de Políticas Setoriais e Emissões (Sinapse) é a ferramenta oficial do governo brasileiro para projeção de cenários de implementação de políticas públicas setoriais e potencial de redução de emissões de GEE, visando ao alcance das metas contidas na Contribuição Nacionalmente

Determinada. A ferramenta permite simular cenários futuros com 48 políticas para seis diferentes setores, abrangendo desde desmatamento, transporte rodoviário, até número de vidas preservadas pela redução nas emissões, entre outros.

Finalmente, para a agenda de adaptação, o Sistema de Informações e Análises sobre Impactos das Mudanças do Clima (AdaptaBrasil) objetiva consolidar, integrar e disseminar informações que possibilitem o avanço das análises dos impactos da mudança do clima, observados e projetados no território nacional, dando subsídios às autoridades competentes pelas ações de adaptação. A plataforma colabora para a disseminação do conhecimento por meio da análise de informações cada vez mais integradas e atualizadas sobre o clima e os riscos de impactos no Brasil, além de garantir a acessibilidade dos principais resultados aos tomadores de decisão em todos os níveis, bem como a pesquisadores, sociedade civil e setor privado.



Figura 6. Logo das plataformas do MCTI

Fonte: As plataformas podem ser acessadas livremente na webpage do ministério.

5.5. Rede Clima

Todas as ações, diretas e indiretas, supradescritas, objetivam desenvolver e fornecer produtos que atendam aos compromissos internacionais do Brasil assim como para orientar as políticas públicas. Os formuladores de políticas e os tomadores de decisão lidam com desafios complexos e exigentes em conhecimento, para os quais, muitas vezes, não existem soluções simples. Nesses casos, a ciência pode e deve apoiá-los, fornecendo evidências rigorosas que permitam melhor compreensão do problema e avaliação das prováveis implicações das opções disponíveis. Esse tipo de contribuição pode melhorar a qualidade, a eficácia e a eficiência da formulação de políticas. Foi com essa visão que, em 2007, o então Ministério da Ciência e Tecnologia, em sua Portaria nº 728, instituiu a Rede Clima (Brasil, 2007).

A Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (Rede Clima), com abrangência nacional, envolve dezenas de grupos de pesquisa em universidades e institutos de todo o País. Seu foco científico cobre todas as questões relevantes das mudanças climáticas, notadamente, são: i) a base científica da mudança do clima: detecção e atribuição de causas; entendimento da variabilidade natural *versus* mudança climática de origem antrópica; ciclo hidrológico e ciclos biogeoquímicos globais e aerossóis; capacidade de modelagem do sistema climático; ii) estudos

de impactos, adaptação e vulnerabilidade para sistemas e setores relevantes: agricultura e silvicultura, recursos hídricos, biodiversidade e ecossistemas, zonas costeiras, cidades, economia, energias renováveis e saúde; e iii) desenvolvimento de conhecimento e tecnologias para mitigação da mudança do clima. Na fase atual, a Rede Clima ocupa-se dos temas científicos integrativos de mudanças climáticas e segurança alimentar, hídrica e energética; saúde humana, cidades e desastres naturais.

Dividida em 15 sub-redes, a Rede Clima age como um braço científico do MCTI, composta por uma série de grupos de pesquisa em universidades, o que garante a capilaridade e a disseminação do conhecimento científico gerado, e parcerias com núcleos de pesquisa estrangeiros.

Referências

ARRHENIUS, S. Ueber den einfluss des atmosphärischen kohlensäuregehalts auf die temperatur der erdoberfläche. **Bihang till Kongliga Vetenskaps-Akademiens Handlingar,** v. 22, n. 1,1, p. 1-102, 1896. General Reference Ac.1070. Disponível em: *https://books.google.com.br/books?id=3OoVAAAAYAAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false*

ARRHENIUS, S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine **and Journal of Science (Fifth Series**), v. 49, n. 251, p. 237-276, 1986. General Reference P.P.1433. Disponível em: *http://www.rsc.org/images/Arrhenius1896_tcm18-173546.pdf*

ARRHENIUS, S. **Worlds in the making.** The evolution of the universe. Borns, H. (Trad.). London: Harper & Brothers, 1908. General Reference 8562.cc.38. Disponível em: *https://archive.org/details/worldsinmakingevooarrhrich/page/n7/mode/2up*

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI. **Portaria MCT nº 728, de 20.11.2007.** Disponível em: *https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/legislacao/portarias/migracao/Portaria_MCT_n_728_de_20112007.html*

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI. **Primeiro relatório bienal de transparência do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.** 2024. Disponível em: *https://repositorio.mcti.gov.br/handle/mctic/6829*

FOURIER, J. Remarques generales sur les temperatures du globe terrestre et des espaces planetaires. **Annales de Chimie et de Physique** (in French), v. 27, p. 136-167. 1824. Archived from the original on 2 August 2020. Retrieved 8 June 2020. Disponível em: *https://www.milestone-books.de/pages/books/003753/jean-baptiste-joseph-fourier/remarques-generales-sur-les-temperatures-du-globe-terrestre-et-des-espaces-planetaires-resume?soldItem=true*

FRANTA, B. On its 100th birthday in 1959, Edward Teller warned the oil industry about global warming. **The Guardian,** jan. 2018. Retrieved 11 January 2021. Disponível em: *https://www.theguardian.com/environment/climate-consensus-97-per-cent/2018/jan/01/on-its-hundredth-birthday-in-1959-edward-teller-warned-the-oil-industry-about-global-warming*

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Homepage.** 2025. Disponível em: *https://www.ipcc.ch*

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Sixth Assessment Report**, 2023. Disponível em: *https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6*

MONROE, Robert. **New Record for annual increase in Keeling curve readings Twelve-month average rose fastest ever in 2024**. University of California San Diego. Scripps Institution of Oceanography. 2025. Disponível em: *https://scripps.ucsd.edu/news/ralph-keeling-curve*

TYNDALL, J. The Bakerian Lecture. On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connexion of radiation, absorption, and conduction. **Philosophical Transactions,** v. 151, 1861. (The Royal Society Publishing: 37). doi:10.1098/rstl.1861.0001 Disponível em: *https://royalsocietypublishing.org/doi/reader/10.1098/rstl.1861.0001*

UNITED NATIONS – UN. **Paris agreement**, 2015. Disponível em: *https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf*

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. **Handbook**. Bonn, Germany: Climate Change Secretariat. 2006. Disponível em: *https://unfccc.int/resource/docs/publications/handbook.pdf*

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. **1ª, 2ª e 3ª Comunicação Nacional do Brasil à UNFCC.** 2004, 2010, 2016. Disponível em: *https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/Comunicacao_Nacional/Comunicacao_Nacional.html*

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. **4ª Comunicação Nacional do Brasil à UNFCC**. 2022. Disponível em: *https://repositorio.mctic.gov.br/bitstream/mctic/4782/1/2020_quarta_comunicacao_nacional_brasil_convencao_quadro_nacoes_unidas_sobre_mudanca_clima.pdf e https://repositorio.mctic.gov.br/bitstream/mctic/4782/3/2020_quarta_comunicacao_nacional_brasil_convencao_quadro_nacoes_unidas_sobre_mudanca_clima_sumario_executivo.pdf*

WEART, S. The carbon dioxide greenhouse effect. *In:* **The Discovery of global warming.** 2003. Disponível em: *https://history.aip.org/climate/co2.htm*

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO. **State of climate in Latin America and Caribbean 2024**, Report WMO, Geneve, n. 1367, 26 p., 2025. Disponível em: *https://library.wmo.int/viewer/69456/download?file=WMO-1367-2024_en.pdf&type=pdf&navigator=1*

Beyond planning: making climate technology implementation finally happen

Emilly Caroline Costa Silva[1], *Gabriela Teixeira Britto*[2], *Marcelo Khaled Poppe*[3], *Caetano Christophe Rosado Penna*[4]

Resumo

Quinze anos após a criação do Mecanismo Tecnológico no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (CQNUMC ou UNFCCC, na sigla em Inglês), a discrepância entre as avaliações das necessidades tecnológicas climáticas e a sua implementação efetiva continua a ser alarmantemente grande. Embora mais de 100 países em desenvolvimento tenham concluído Avaliações das Necessidades Tecnológicas (TNA) no âmbito do Mecanismo

Abstract

Fifteen years after establishing the Technology Mechanism under the UNFCCC, the gap between climate technology needs assessments and actual deployment remains alarmingly wide. While over 100 developing countries have completed Technology Needs Assessments (TNA) under the UNFCCC Technology Mechanism since 2009, the translation of these assessments into actual technology deployment remains limited. The Technology

1 Engenheira de Energia pela Universidade de Brasília (UnB), mestre em Desenvolvimento Sustentável pela Universidade de Brasília (UnB) e assessora técnica no Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Membro do Advisory Board do Climate Technology Centre & Network (CTCN) e do Steering Committee da Rede de Organizações Não-Governamentais de Pesquisa e Ciência Independente (Ringo).

2 Bacharel em Relações Internacionais pela UnB, com MBA em Gestão Estratégica e Inovação. É assessora técnica do CGEE, com foco em cooperação internacional e desenvolvimento sustentável. Pesquisa estruturas de governança global e a cooperação brasileira em mudança climática.

3 Engenheiro eletricista pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), com diploma de estudos aprofundados (DEA) em Economia de Sistemas Energéticos e Inovação pela Universidade de Paris-Dauphine e Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN). É líder de projetos no CGEE.

4 Diretor de Projetos Estratégicos em CT&I no CGEE. Doutor em Política de Ciência e Tecnologia pela Universidade de Sussex. Mestre em Governança da Tecnologia pela Tallinn University of Technology (TalTech) e economista pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Tecnológico da UNFCCC desde 2009, a tradução dessas avaliações em implementação tecnológica efetiva continua a ser limitada. O Programa de Implementação Tecnológica (TIP), atualmente em negociação, representa a inovação institucional mais promissora na cooperação em tecnologia climática desde Cancún. No entanto, o seu sucesso não está garantido. Este artigo analisa as barreiras persistentes ao desenvolvimento e à transferência de tecnologia climática, com base em experiências de implementação em países em desenvolvimento, para identificar o que tem limitado o progresso. Argumentamos que o TIP pode ter sucesso onde os mecanismos anteriores falharam, mas apenas se três condições críticas forem cumpridas: estabelecer uma arquitetura de financiamento dedicada que vá além da assistência técnica para apoiar a demonstração e a implantação; criar estruturas de governança que garantam a verdadeira apropriação pelo país, em vez de prioridades impulsionadas pelos doadores; e desenvolver mecanismos para fazer avançar as tecnologias através do "vale da morte", desde a demonstração até à implantação comercial sustentada. Com as metas climáticas para 2030 se aproximando rapidamente, acertar no TIP não é apenas desejável - é essencial para traduzir a ambição climática em ações mensuráveis.

Palavras-chave: Transferência de tecnologia climática. Implementação de tecnologia. Mecanismo de tecnologia da UNFCCC. Política de inovação. Países em desenvolvimento. Financiamento climático.

Implementation Programme (TIP), currently under negotiation, represents the most promising institutional innovation in climate technology cooperation since Cancún. However, its success is not guaranteed. This commentary analyzes persistent barriers to climate technology development and transfer, drawing on implementation experiences across developing countries to identify what has constrained progress. We argue that TIP can succeed where previous mechanisms have fallen short, but only if three critical conditions are met: establishing a dedicated financing architecture that extends beyond technical assistance to support demonstration and deployment; creating governance structures that ensure genuine country ownership rather than donor-driven priorities; and developing mechanisms to advance technologies through the "valley of death" from demonstration to sustained commercial deployment. With the 2030 climate targets rapidly approaching, getting TIP right is not merely desirable - it is essential for translating climate ambition into measurable action.

Keywords: *Climate technology transfer. Technology implementation. UNFCCC technology mechanism. Innovation policy. Developing countries. Climate finance.*

1. Introduction: the persistent implementation gap

Climate change encounters systemic challenges that demand technological, political, and institutional solutions regarding both mitigation and adaptation needs. While significant progress has been made in setting global climate targets under the UNFCCC and the Paris Agreement, the translation of these commitments into national and local action remains uneven and often limited in scale (UNFCCC, 2022; IPCC, 2022).

The numbers tell a sobering story. While over 100 developing countries have completed Technology Needs Assessments (TNA) under the UNFCCC Technology Mechanism since 2009 (UNEP-CCC, 2025), the translation of these assessments into actual technology deployment remains limited. Although nearly all TNA produce Technology Action Plans (TAPs) as part of the standardized methodology (UNFCCC, 2020), systematic tracking of implementation outcomes has proven challenging, with the Technology Executive Committee noting that "many TAPs were insufficiently bankable, and the eventual success was difficult to monitor" (UNCC-TEC, 2022, p. 13). This implementation gap persists despite more than 70% of countries referencing their TNA in Nationally Determined Contributions (UNEP-CCC, 2025), highlighting a critical disconnect between technology prioritization and scaled deployment in developing countries. This implementation gap is not merely a technical shortcoming: it reflects deeper structural, institutional, and political barriers that have proven resistant to conventional policy interventions.

The development and transfer of climate technologies - commonly referred to as climate technology development and transfer (CTDT) - is essential for turning ambition into effective measures, especially in developing countries where resource constraints and capacity limitations often hinder progress (UNCTAD, 2021). CTDT encompasses the processes through which countries access, adapt, co-develop, and deploy technologies suited to their climate and national circumstances. This includes not only hardware and infrastructure but also the transfer of technical knowledge, skills, practices, and institutional arrangements with co-benefits once the technology is available for use. As recognized by WIPO (2010), UNCTAD (1985), and the UNFCCC (2019), effective technology transfer must go beyond the delivery of tools to include the strengthening of endogenous capabilities, local innovation ecosystems, and long-term cooperation frameworks.

To facilitate CTDT, the UNFCCC established the Technology Mechanism in 2010 at COP 16 in Cancún. This mechanism was created to support the implementation of Article 4.5 of the Convention, which commits developed countries to promote, facilitate, and finance the transfer of environmentally sound technologies to developing countries. It also advances Article 10 of the Paris Agreement, which strengthens cooperation on technology development and transfer as a means of enhancing resilience and reducing emissions through collaborative R&D, innovation systems, and capacity-building efforts (UNFCCC, 2015; UN, 2016).

The Technology Mechanism comprises two complementary bodies: the Technology Executive Committee (TEC), which focuses on policy guidance and strategic recommendations on barriers and enabling environments for technology development and diffusion; and the Climate Technology Centre and Network (CTCN), which acts as the implementation arm, delivering technical assistance, facilitating South-South and North-South cooperation, and promoting access to technology information and expertise through its global network with over 900 institutions (CTCN, 2022).

Despite this institutional architecture, multiple assessments - including those conducted under the Global Stocktake (GST) and the deliberations of Agenda Item 14 of the Subsidiary Body for Implementation (SBI) - have pointed to persistent weaknesses. Among the main challenges identified are inadequate inter-ministerial coordination at the national level, insufficient coherence in the governance of innovation policies, poor financial alignment between climate and technology portfolios, and limited resources to support the piloting, demonstration, and scaling up of climate technologies (UNFCCC, 2023a; CTCN, 2022).

The first Global Stocktake reaffirmed the urgency of moving from planning to delivery, recognizing that CTDT remains a critical enabler of this transition, especially for enhancing resilience and achieving low-carbon development pathways (UNFCCC, 2023a). Against this backdrop, the Technology Implementation Programme (TIP) has emerged as a potential response to longstanding implementation barriers. Recognized in Decision 1/CMA.5 (para. 110) and currently under development by the TEC, TIP seeks to shift focus from "what is needed" to "how to deliver" climate technologies at scale (UNFCCC, 2023a).

This commentary argues that TIP represents a genuine opportunity to break the cycle of ambitious frameworks yielding modest outcomes, but only if fundamental design questions are addressed. We identify three critical conditions for success, drawing on 15 years of implementation experience, comparative analysis of technology cooperation initiatives, and insights from innovation economics. The stakes could not be higher: with 2030 rapidly approaching, effective technology implementation is no longer optional but imperative for meeting global climate commitments and supporting inclusive, sustainable development.

2. Understanding why implementation fails: structural barriers beyond capacity

Climate policies continue to face a significant gap between international commitments and practical outcomes, particularly regarding the development and transfer of climate technologies. As highlighted by the United Nations Environment Program (UNEP, 2022), the discrepancy

between policy ambition and actual progress remains stark, emphasizing the need for systemic approaches to enhance technology development, application, deployment and diffusion across diverse national contexts.

The gap between climate technology needs and actual deployment is not primarily a problem of awareness or aspiration. Developing countries know what technologies they need: the TNA process has made this clear. The problem lies in the systematic barriers that emerge when moving from assessment to action.

Barriers are often framed as "capacity gaps" in recipient countries, a characterization that obscures more fundamental issues. While capacity or resource constraints certainly exist, the persistent implementation gap reflects deeper structural weaknesses in how technology cooperation is organized, financed, and governed. Understanding these root causes is essential for designing mechanisms that can actually work.

2.1. Absorptive capacity and innovation system fragmentation

The absorptive capacity of national innovation systems (NIS) plays a decisive role in determining the effectiveness of technology transfer. Countries with well-developed innovation infrastructures, robust educational systems, and dynamic research and development (R&D) sectors are better positioned to adapt, internalize, and further develop imported technologies. As Cimoli, Dosi, and Stiglitz (2019a, 2019b) emphasize, many developing nations face structural weaknesses in their innovation systems, including limited scientific and technical expertise, insufficient infrastructure, inadequate resources, and fragmented policy and regulation frameworks. These deficiencies reduce the ability of local actors to engage meaningfully with transferred technologies, leading to technological dependency or underutilization that hinders sustainable development.

The challenge of low absorptive capacity extends beyond simple resource scarcity. Resources are yet inert unless they are matched by systemic capabilities (Penna *et al.,* 2025). Many developing countries do possess pockets of genuine innovation capability (for example, universities conducting relevant research, private firms with technical expertise, civil society organizations with deep community knowledge). The problem, then, is fragmentation: these capabilities remain disconnected, unable to coalesce around shared technology priorities, impairing the absorption and deployment of transferred technologies.

Coordination failures within innovation systems have significantly hindered technology deployment despite existing technical capacities. Brazil's Inova Petro program exemplifies this challenge: launched with BRL 3 billion in resources to support oil and gas supply chain innovation, the

program struggled due to a misalignment between technical requirements and industry capabilities, coupled with limited market-shaping capabilities, and to weak coordination between implementing organizations (Penna *et al.*, 2025). Regarding climate technology deployment, Kenya has faced similar constraints from institutional fragmentation and weak operational coordination among government ministries, preventing effective utilization of existing renewable energy capabilities (FAO-UNDP, 2017; UNCC-TEC, 2023a).

Fragmentation is thus compounded by weak coordination among national stakeholders across government, private sector, academia, and civil society. Effective climate technology deployment requires the integration of diverse interests, capacities (resources), and capabilities through collaborative governance mechanisms. Yet institutional fragmentation and policy misalignment often prevail, resulting in disjointed initiatives and missed opportunities for synergistic action (Mabee *et al.*, 2012). The absence of cohesive multi-stakeholder engagement frameworks undermines efforts to build national consensus around climate technology priorities and to leverage collective absorptive capabilities for technology implementation.

2.2. Technology-context mismatches

Technology transfer is also impaired by contextual mismatches between technologies developed in advanced economies and the needs and technological contexts of developing countries (IPCC, 2022). A wind turbine designed for European grid infrastructure may be incompatible with the technical specifications and maintenance requirements of African power systems. Agricultural technologies optimized for large-scale mechanized farming may be inappropriate for smallholder contexts. These mismatches represent fundamental barriers that can render otherwise sound technologies ineffective or unsustainable.

Furthermore, many climate technologies are still at early Technology Readiness Levels (TRL) - meaning, they are still in the initial stages of scientific research or technological development - , thus limiting their immediate applicability. According to the National Renewable Energy Laboratory (Mendoza *et al.*, 2021), innovations at lower TRL require significant investment in research, demonstration, and validation before they can be effectively scaled and deployed at commercial levels. Achieving progress in research, demonstration, and validation depends on economically feasible and sustainable technology transfer, accompanied by sustained systemic efforts to support local innovation, ensuring that technologies are adapted and optimized for specific socio-economic and environmental conditions.

These challenges have historically been framed through the lens of "appropriate technology": the notion that developing countries should adopt technologies suited to their specific economic, social,

and environmental contexts, rather than simply replicating technologies designed for advanced economies (Schumacher, 1973). While this perspective usefully highlights the importance of context-specificity and local adaptation, it should not be interpreted as limiting developing countries to low-complexity or intermediate technologies. Recent experience demonstrates that developing countries can successfully develop and absorb frontier technologies when supported by systemic approaches that build endogenous capabilities, strengthen innovation ecosystems, and foster effective coordination among public, private, and research actors (Penna *et al.,* 2025; Cimoli *et al.,* 2019a; 2019b).

The critical distinction is not between 'advanced' versus 'appropriate' technologies, but rather between technology transfer approaches that build local capacity for continued innovation and adaptation, and those that create technological dependency. Effective climate technology implementation thus requires moving beyond simplistic notions of appropriateness toward systemic capacity-building that enables developing countries to both adapt existing technologies to local contexts and develop frontier solutions tailored to their specific climate challenges.

2.3. The Role of international cooperation - and its limitations

International cooperation is essential given the complexity of technology transfer in terms of actors, financial sources, implementation arrangements, goals, and governance structures (IPEA, 2022). Different cooperation arrangements allow countries to involve national actors of the private sector, academia and industry in various stages of development and technology transfer, depending on specific national realities.

South-South Cooperation (SSC) can reduce contextual mismatches of technology for similar national conditions and better implement shared experiences. Triangular Cooperation (TRC) can facilitate articulation of SSC and North-South Cooperation (NSC), combining financial and technical resources for the least developed country, increasing scale of cooperation provided by developing countries and reducing costs for developed countries (Pino, 2013).

However, international cooperation mechanisms often suffer from their own limitations, particularly when cooperation is shaped by donor priorities rather than recipient needs. Donor-driven technology cooperation frequently creates misalignment with recipient country needs, undermining climate technology effectiveness. The donor interest model demonstrates that climate finance allocation is primarily driven by donor countries' strategic and economic interests rather than recipient vulnerabilities, with climate-vulnerable countries often receiving a small share of available adaptation finance despite their acute needs (Nor, 2025; Climate Policy Initiative, 2022).

Implementation of the Paris Declaration's ownership principles has been superficial, with donors and recipients maintaining pre-existing power dynamics "in form rather than in substance" due

to lack of political will on both sides (Brown, 2016). This supply-driven approach has resulted in aid projects being managed by external actors rather than recipient governments, while creating parallel structures that undermine local capacity building and fail to address context-specific technology needs (Pandey *et al.*, 2022).

2.4. Financial architecture: the persistent bottleneck

Limited financial resources to climate technology projects continue to represent a key barrier to the development and transfer of climate technologies. While climate finance has grown in recent years, Buchner *et al.* (2021) note that funding remains largely concentrated in low-risk, short-term initiatives, with comparatively little support directed toward innovative solutions and long-term infrastructure critical for sustained emissions reductions. The issue is not a quantitative one of lack of available financial resources but a qualitative one of where available funding goes to (Penna *et al*, 2023).

Developing countries face persistent difficulties in accessing international climate finance, including complex eligibility criteria, limited technical capacity for project preparation, and challenges in meeting co-financing requirements (IEA, 2022). These constraints slow the deployment of transformative climate technologies and contribute to the implementation gap.

At COP29 in Baku, Parties to the Paris Agreement agreed to scale up climate finance to developing countries to at least USD 1.3 trillion per year by 2035 from all public and private sources, with developed countries committing to take the lead in mobilizing at least USD 300 billion annually (UNFCCC, 2024a). However, quantity alone is insufficient. The architecture of climate finance - how funds are mobilized, allocated, and disbursed - matters enormously for climate technology implementation. Closing the implementation gap requires not only increased investment levels but also a qualitative change in investment strategies: the prevailing rules that guide investment practices are inadequate to foster the systemic transformations needed for sustainability transitions, necessitating new frameworks that support technology development across the full innovation lifecycle and enable the multi-system changes required for low-carbon sociotechnical systems (Penna *et al.*, 2023).

2.5. The "Valley of Death" in climate technology innovation

An additional challenge, therefore, relates to advancing climate technologies beyond intermediate TRLs to stages where they are fully demonstrated, validated in operational environments, and ready for market deployment (TRL 4-7). The so-called "valley of death" in innovation processes,

where promising technologies fail to progress due to a lack of financing and support, is particularly acute in the climate technology domain (Mendoza *et al.,* 2021).

Technologies at TRL 4-7 have proven technical feasibility but have not yet demonstrated commercial viability at scale. This is precisely the stage where public support is most needed but often least available. Research grants support early-stage development; commercial finance becomes available once market viability is proven. The gap in between - where pilot projects must scale to demonstration plants, where manufacturing processes must be refined, where supply chains must be established - remains chronically underfunded.

Overcoming this barrier requires targeted public and private investments that promote later-stage technology development and foster demonstration projects capable of proving technological feasibility and scalability under real-world conditions. There is a pressing need to prioritize long-term investments in climate technology projects. Short-term pilot initiatives, while valuable for initial learning, are insufficient to achieve the sustained technological transformations required for deep decarbonization and climate resilience. As the (IEA, 2022) points out, long-duration projects facilitate institutional learning, technological refinement, and infrastructure development, all of which are essential for embedding climate technologies into national development pathways.

2.6. Private sector engagement: too little, too late

Private sector engagement is another critical dimension in bridging the implementation gap. Firms possess vital resources, technical know-how, and market access necessary for the widespread diffusion of climate technologies. However, as Lee and Mwebaza (2022) highlight, private companies tend to get involved too late in important processes for CTDT. The sector usually engages only in the demonstration, incubation, commercialization, and diffusion phases in the RD&D process, making it harder for the proper incorporation of local customers' needs for creation of new markets.

Multiple barriers hinder earlier private sector participation, including policy uncertainty, perceived investment risks, and underdeveloped markets for green technologies (UNIDO, 2020). Without targeted incentives, risk mitigation instruments, and clear regulatory signals, private sector actors may be reluctant to invest in innovative but uncertain climate technologies, thereby limiting their potential for large-scale deployment (IEA, 2023).

Addressing these barriers requires the establishment of enabling environments that foster public-private partnerships, streamline regulatory frameworks, and enhance market predictability to stimulate private sector innovation and investment. The establishment of public-private partnerships with royalty sharing arrangements, proper intellectual property

rights (IPR) negotiations, safe spaces for innovation - like regulatory sandboxes - and investment in research while climate technologies are being developed can guarantee the return on substantial investments to the private sector.

2.7. The Strategic importance of National Designated Entities

Against this backdrop, the role of Nationally Designated Entities (NDE) becomes strategically important. As focal points under the UNFCCC's Technology Mechanism, NDE are mandated to facilitate the identification, development, and transfer of climate technologies at the national level. Strengthening the institutional capacity of NDE is vital for improving policy coherence, enhancing stakeholder coordination, and catalyzing technology partnerships. The UNFCCC underscores that well-functioning NDE can serve as effective intermediaries between domestic actors and international technology support mechanisms, thereby improving access to technological resources and capacity-building initiatives.

However, many NDE operate with limited authority, insufficient resources, and weak connections to actual decision-making processes. For instance, Chile's NDE has demonstrated success stories in technical assistance on biomass-to-energy conversion technology, reporting improvements in policy development and technical capacities, with progress in scaling up climate technologies. However, the NDE of countries like Mongolia and Haiti report that their work is constrained by a lack of technical expertise, understaffing, and limited awareness of available international support mechanisms, directly impeding their ability to function as effective intermediaries (UNCC-TEC, 2024). Strengthening NDE requires elevating their institutional standing, ensuring adequate budgets, and creating formal mechanisms for them to shape national technology strategies.

2.8. Synthesizing the Barriers

The interplay among these multiple factors - policy coordination failures, financial architecture gaps, technology-context mismatches, private sector hesitation, and weak institutional intermediaries - highlights the complexity of addressing the climate policy implementation gap. Table 1 synthesizes these systematic barriers and their manifestations.

Table 1. Systematic Barriers to Climate Technology Implementation

Barrier	Description	Example
Absorptive capacity and innovation system fragmentation	Weak R&D infrastructure, fragmented policy frameworks, and poor coordination among government, private sector, academia, and civil society limit countries' ability to internalize, adapt, and develop climate technologies	Low investment in R&D and overlapping mandates between environmental and energy ministries in Sub-Saharan Africa delay solar energy deployment due to conflicting policies and limited technical education
Technology-context mismatches	Technologies developed in advanced economies may not align with recipient countries' technological contexts, infrastructure, or needs. Many climate technologies remain at early Technology Readiness Levels, lacking demonstrated viability in diverse contexts	Mismatch between wind technology designs developed in Europe and the grid infrastructure capacity in some African countries, limiting technology transfer effectiveness and requiring context-specific adaptation
Limitations of international cooperation mechanisms	International cooperation mechanisms suffer from fragmentation, poor coordination, and superficial implementation of country ownership principles. Donors and implementing agencies often prioritize their own strategic interests over recipient country needs	Technology transfer projects that fail to align with national development priorities or that duplicate efforts due to lack of coordination among international partners and national agencies
Financial architecture gaps	Limited access to concessional finance and investment capital constrains technology development and deployment. Developing countries face persistent difficulties accessing international climate finance due to complex eligibility criteria and lack of project preparation capacity	High-risk climate technology projects in developing countries struggle to secure funding due to perceived investment risks, limited track records, and inadequate financial instruments tailored to technology lifecycle needs
The 'Valley of Death' in climate technology innovation	Technologies at TRL 4-7 face critical funding gaps preventing advancement from technical feasibility to commercial viability. Lack of demonstration and commercialization support causes promising technologies to stall before achieving scale	Promising carbon capture and storage technologies and advanced battery systems stall at demonstration phases due to insufficient funding for pilot projects and scale-up, preventing progression to commercial deployment
Insufficient private sector engagement	Policy uncertainty, perceived investment risks, underdeveloped markets, and lack of enabling environments deter early private sector participation in climate technology development and deployment, despite firms possessing vital resources and market knowledge	High perceived risks and regulatory uncertainty deter private investment in renewable energy technologies in Latin American countries, resulting in delayed market development and missed opportunities for public-private partnerships
Insufficient Institutional Capacity of NDEs	Weak Nationally Designated Entities (NDEs) struggle to coordinate domestic technology needs and access international support mechanisms (UNFCCC)	Many NDEs lack sufficient staff and technical expertise to facilitate technology partnerships, limiting their role as intermediaries

These barriers are not inevitable features of technology cooperation. They reflect design choices - often implicit - in how mechanisms are structured, financed, and governed. The critical question is whether TIP can make different design choices that address these root causes rather than merely working around their symptoms.

3. The Technology Implementation Programme: promise and preconditions

The Technology Implementation Programme has emerged from recognition that the Technology Mechanism, despite its sophisticated institutional design, has not delivered implementation at the necessary pace or scale. TIP seeks to respond to persistent challenges such as insufficient follow-up to Technology Needs Assessments (TNA), fragmented stakeholder engagement, weak support for National Designated Entities (NDE), and limited investment in late-stage innovation. The program aims to represent a paradigm shift from identifying "what is needed" (TNA) to addressing "how to deliver" (TAP) climate technologies at scale (UNFCCC, 2023a).

The development of Technology Action Plans (TAP) has become an essential instrument to operationalize the priorities identified in TNA. TAP outline concrete actions, timelines, responsible institutions, and potential sources of support for deploying prioritized technologies, serving as a bridge between needs identification and implementation. TIP reinforces the importance of ensuring technical and financial backing for the full implementation of TAP, promoting a more integrated and action-oriented approach. By doing so, it seeks to enhance country ownership, strengthen institutional capacities, and foster greater alignment between national technology priorities and international cooperation and funding mechanisms.

3.1. What Makes TIP Different?

Although not yet formally adopted, TIP has been recognized in Decision 1/CMA.5 (para. 110) of the first Global Stocktake, which invites further development of the initiative (UNFCCC, 2023a). It represents a deliberate shift from assessment to execution by explicitly aiming to address the gaps identified in the first periodic assessment of the Technology Mechanism TIP's stated goal is to promote cross-sectoral collaboration, enhance enabling environments, and mobilize technical and financial support, essentially in developing countries. Its focus on aligning national priorities with coordinated implementation efforts positions TIP as a strategic response to longstanding implementation barriers.

Several design features distinguish TIP from previous initiatives (UNFCCC, 2024b; 2025). Its proposed innovative features include creating "implementation accelerators" to move projects from planning to deployment and establishing "national systems of innovation support" to build endogenous capacity. The TIP is thus designed to provide more integrated support across the technology lifecycle, with a clear mandate to strengthen NDEs and facilitate the implementation of priorities identified in TAPs and NDC.

In parallel, other initiatives under the UN system reinforce the importance of implementation. The Climate Technology Centre and Network (CTCN) continues to support implementation-oriented technical assistance aligned with TNA, NDC, and adaptation strategies. The CTCN's regional and thematic programs connect national priorities to knowledge transfer and matchmaking services, aiming to catalyze real-world climate solutions (CTCN, 2022). TIP distinguishes itself through five key innovations: (1) functioning as an "implementation accelerator" with structured processes for TAP execution; (2) integrated support across the technology lifecycle connecting multiple planning instruments; (3) strengthened NDE capacity through regional dialogues; (4) explicit linkages between technology and Financial Mechanism entities; and (5) national systems of innovation focus on building endogenous capacities beyond individual technology projects.

3.2. Three critical conditions for success

TIP's promise is real, but so are the risks of repeating past patterns of ambitious initiatives yielding incremental results. Drawing on the barriers analyzed above and comparative experience with technology cooperation mechanisms, we identify three critical conditions that TIP must fulfill to achieve transformative impact.

Condition 1: a dedicated financing architecture for the full technology lifecycle

The most fundamental requirement is establishing a financing architecture specifically designed to support technology implementation, not merely technical assistance for planning. Current climate finance mechanisms, while valuable, are poorly suited to the specific needs of technology deployment. They tend to fund either early-stage research or large-scale infrastructure, leaving the critical middle stages - demonstration, piloting, early commercialization - chronically underfunded.

TIP must include dedicated financial resources with several distinctive features. First, funding must be available across the entire technology readiness spectrum, with particular attention to TRL 4-7 where the "valley of death" is most acute. Second, financing mechanisms must be accessible to the institutions actually implementing technologies - not just national governments but also subnational entities, research institutions, private firms, and civil society organizations. Third, approval processes must be streamlined to match the timelines of technology development, which often move faster than typical multilateral funding cycles.

This does not necessarily require creating entirely new funds, but new finance frameworks that involve diversity of resources and sources. Existing mechanisms like the Green Climate Fund could establish dedicated technology implementation windows with appropriate design features.

What matters is that finance explicitly targets implementation, with eligibility criteria, risk tolerance, and disbursement mechanisms aligned with that purpose.

The COP29 commitment to mobilize USD 1.3 trillion annually by 2030 provides a promising context, but without intentional allocation to technology implementation - and particularly to the middle stages of the innovation process - this finance may flow around rather than through the implementation bottleneck (UNFCCC, 2024a). TIP should establish clear targets: for example, that at least 15-20% of climate technology finance should support demonstration and early deployment projects.

Condition 2: governance structures ensuring genuine country ownership

Technology implementation succeeds when driven by national priorities and embedded in country-led development strategies. It fails when shaped primarily by donor preferences or international templates applied uniformly across diverse contexts. TIP must embody genuine country ownership, which requires more than rhetorical commitment.

Strengthening NDE is essential but insufficient. Many countries have established NDE as required, but these entities often lack the authority, resources, and institutional positioning to shape technology priorities. TIP should support elevating NDE to positions of genuine influence, ideally with direct connections to ministerial decision-making, cross-sectoral coordination mandates, and adequate budgets for their coordination functions.

Beyond NDE strengthening, country ownership requires that TAP development and implementation be genuinely participatory processes. This means early and sustained engagement with private sector actors, research institutions, civil society organizations, and affected communities. The Senai Cimatec and Innovation Institute's model in Brazil (Box 1) demonstrates how involving diverse stakeholders from the outset - particularly the private sector, which will ultimately deploy many technologies - creates alignment and shared investment in success.

Box 1. The Brazilian SENAI CIMATEC and Innovation Institute's Model

The *Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial* (Senai) is a Brazilian private and non-profit institution of public interest. SENAI's goal is to stimulate industrial innovation through education, consultancy, applied research, technical and technological services for the competitiveness of Brazilian companies. It is recognized as a model of professional education and quality and one of the largest educational complexes worldwide. The Integrated Center for Manufacturing and Technology (Cimatec) of Senai was created to meet the demands for industrialization in Bahia.

Cimatec is a center of excellence in education, research and industrial innovation, associated with SENAI and recognized nationally and internationally for its work in technology and development. Transformed into a University Centre in 2017, it stands out for its high-level engineering courses, master's and doctoral programs, and partnerships with different kinds of institutions from public and private sectors, such as Fraunhofer and companies like Petrobras and Embraer. This articulation allows early involvement of the private sector in the planning of technology development, creating opportunities for market creation, adjustments to local realities and guarantee of economic sustainability for development, deployment and diffusion phases. The case of Senai Cimatec exemplifies how early involvement of private sector, academia, and government makes the process of developing, adapting, maturing, and transferring technologies possible. This model has yielded significant outcomes, including a portfolio of over USD 55 million in R&D&I projects and more than 60 registered patents (SENAI CIMATEC, n.d.). Its success, in contrast to linear technology transfer approaches, lies in its integrated ecosystem that fosters co-creation by involving private sector partners like Shell and Embraer from the earliest stages of development, ensuring that innovation is demand-driven and embedded within the national industrial context.

The Senai Cimatec model is closely related to the way Senai deploys a network of innovation institutes. In Brazil. The model's distinctive features include integration of technology centers with academic programs, early private sector involvement through demand-oriented contract research, Fraunhofer-modeled governance with systematic lifecycle management, and advanced financial engineering targeting 100% cost recovery through own revenues (Will et al., 2020). A 2025 peer-reviewed study by Fraunhofer IPK found that Senai's network of 26 Innovation Institutes contributed 0.66% to Brazil's GDP, executed thousands of R&D projects totaling 2.5 billion Brazilian reais with more than 800 companies, with 56% involving SMEs, connecting over 185 startups with 90 large enterprises through technological challenges (Schubert *et al.*, 2024).

Country ownership also has implications for how international support is provided. Technical assistance should respond to country-articulated needs rather than predetermined packages. Financial support should align with TAP priorities rather than requiring countries to adjust their strategies to fit available funding categories. Monitoring and evaluation frameworks should measure progress against country-defined objectives, not standardized international metrics that may not capture what matters locally.

This principle extends to the modalities of international cooperation. South-South and Triangular Cooperation arrangements often provide better ownership dynamics than traditional North-South transfers, as they involve countries with more similar development contexts and fewer historical power asymmetries. TIP should explicitly encourage and facilitate these cooperation modalities, creating platforms for countries to share implementation experiences and adapt successful approaches to their contexts.

Condition 3: mechanisms to advance technologies from demonstration to sustained deployment

The third critical condition addresses the "valley of death" directly. TIP must include specific mechanisms to help technologies progress from successful pilots and demonstrations to sustained commercial deployment. This is where many promising climate technologies have stalled: proven technically but unable to achieve the scale needed for meaningful climate impact.

Several elements are necessary. De-risking instruments can help attract private investment to early-stage deployment by reducing perceived financial risk. These might include partial guarantees, first-loss capital, or results-based finance that rewards successful deployment milestones. Regulatory sandboxes and other safe spaces for innovation allow technologies to be tested under real-world conditions with appropriate oversight but without facing the full regulatory burden designed for mature technologies.

Market creation mechanisms are equally important. Many climate technologies face a chicken-and-egg problem: they cannot achieve cost competitiveness without scale, but cannot achieve scale without initial markets willing to accept higher costs. Strategic public procurement, feed-in tariffs, carbon pricing, and other demand-side policies can create initial markets that allow technologies to move down cost curves and become commercially viable.

Long-term partnership arrangements between technology developers and deployers can provide the sustained engagement necessary for successful adaptation and refinement. Technologies rarely transfer seamlessly, as they require ongoing technical support, training, troubleshooting, and incremental improvement. TIP should facilitate multi-year partnerships that provide this sustained engagement rather than one-off transfers.

The framework must also address intellectual property considerations, which remain contentious in climate technology discussions. While respecting legitimate IP rights, TIP should explore mechanisms like technology pools, voluntary licensing arrangements, and patent clarity initiatives that can reduce IP-related barriers to deployment without undermining innovation incentives.

In the global health sector, for instance, the UN-backed Medicines Patent Pool (MPP, 2024) has successfully accelerated access to affordable medicines in developing countries by negotiating voluntary licenses from patent holders and sub-licensing them to generic manufacturers. A similar mechanism for climate technologies could facilitate access to key patented designs for renewable energy or adaptation technologies, contingent on establishing a trusted intermediary to manage licensing and ensure quality.

4. Moving forward: recommendations for tip design and implementation

If TIP is to fulfill its promise, specific design decisions in the current negotiation phase will prove decisive. We offer recommendations for UNFCCC negotiators, the Technology Executive Committee, Nationally Designated Entities, and development partners.

4.1. For UNFCCC negotiators and the Conference of the Parties

First, formal adoption of TIP should include explicit commitments on financing, not merely aspirational language about mobilizing resources. Negotiators should establish a dedicated TIP financing window, either within existing climate funds or as a new mechanism, with clear annual targets. Currently, CTCN, Technology Mechanism's implementing arm, has an operational budget of 10 million. Nevertheless, an initial goal for a real global climate technology implementation should be at least USD 500 million annually, scaling to USD 2 billion by 2030. This would represent a serious commitment to implementation; implementation, despite COP29 actual results in terms of finance mobilization.

Second, TIP's governance structure should ensure developing country voice and leadership. The program should be guided by a steering committee with majority representation from developing countries, particularly Least Developed Countries and Small Island Developing States. This ensures that implementation priorities reflect the needs of those most affected by climate change and most constrained in their implementation capacity.

Third, establish mandatory biennial reporting on TIP implementation outcomes, with quantitative indicators on TAP implementation rates, technologies deployed, finance mobilized, and capacity built. This accountability mechanism should feed into the Global Stocktake process, making technology implementation a visible component of climate progress assessments.

4.2. For the Technology Executive Committee and CTCN

The TEC should develop standardized but flexible methodologies for assessing TAP readiness for implementation support. Not all TAPs are equally ready for scaled implementation: some require additional planning, others additional capacity building, and still others are ready for immediate financial support. Clear criteria help prioritize resources effectively while avoiding the perception that implementation support is allocated arbitrarily.

Create an "implementation mentorship" program pairing NDEs from countries with successful technology deployment experiences with counterparts in countries earlier in their implementation journeys. South-South learning is often more effective than North-South technical assistance for implementation challenges, as successful developing countries have recent experience overcoming similar barriers.

The CTCN should focus on existing networks bringing together countries working on similar technologies to establish sector-specific technology deployment. For example, the network could focus on the deployment of small-scale renewable energy in island contexts, or climate-smart agriculture in semi-arid regions. Reinforcing these networks facilitates peer learning, enables joint procurement to achieve scale economies, and creates communities of practice around specific implementation challenges.

4.3. For national governments and designated entities

National governments should elevate NDE institutionally, positioning them with clear cross-ministerial coordination mandates and direct access to ministerial decision-making. Where possible, locate NDE within or closely linked to national innovation agencies or development planning ministries rather than isolated in single sectoral ministries.

Establish national climate technology development funds with mandatory private sector co-investment requirements. These funds can support demonstration projects, provide de-risking capital, and create initial markets for promising technologies. The co-investment requirement ensures private sector engagement from the outset while public finance reduces perceived risk.

Develop regulatory frameworks that facilitate technology piloting and demonstration, including regulatory sandboxes for climate technologies. These frameworks should balance appropriate oversight with the flexibility needed for genuine innovation and adaptation.

4.4. For development partners and international financial institutions

Bilateral development assistance should explicitly align with TAP priorities rather than donor-determined technology preferences. This requires discipline from development partners to let country priorities guide support rather than promoting technologies where donors have existing capabilities or commercial interests.

International financial institutions should develop specialized financial products for climate technology implementation, particularly for the TRL 4-7 range. These products should have higher risk tolerance than conventional project finance, longer repayment periods that match technology deployment timelines, and streamlined approval processes.

Create results-based financing mechanisms that reward successful technology deployment rather than only funding inputs. For example, payments could be triggered when a technology achieves specific deployment milestones - successful operation for 12 months, replication in multiple sites, transfer of capabilities to local operators - rather than simply upon project completion.

4.5. Beyond TIP: toward genuine technology partnerships

While TIP represents important institutional innovation, truly transformative change in climate technology implementation will require evolving from "transfer" paradigms toward genuine technology partnerships and co-development. The Senai Cimatec's and Innovation Institutes' model hints at this alternative approach, where developing country institutions are innovation partners from the outset rather than recipients of completed technologies.

Technology implementation also brings significant co-benefits for development. It enables access to clean energy, strengthens climate resilience, fosters industrial modernization, and supports job creation in emerging environmentally sound sectors. These multidimensional benefits reinforce the importance of embedding technology strategies into broader national development plans and highlight the strategic relevance of implementation for both mitigation and adaptation.

To fully realize this potential, it is critical to institutionalize national implementation mechanisms, enhance inter-ministerial coordination, and provide long-term support to innovation ecosystems. Multi-stakeholder collaboration platforms, such as those envisaged under TIP and currently operational under the CTCN, can promote inclusive governance, align technical cooperation with country-driven objectives, and unlock synergies between actors. Furthermore, the incorporation of implementation agendas into South-South, North-South, and triangular cooperation frameworks is essential to accelerate technological transitions globally.

5. Conclusion: a closing window of opportunity

The current momentum around TIP offers a unique window of opportunity to translate climate technology ambition into implementation reality. Fifteen years of experience with the Technology Mechanism have clearly identified what constrains progress: fragmented national coordination, insufficient and inappropriately structured finance, weak mechanisms to advance technologies through demonstration to deployment, and implementation approaches that privilege donor priorities over country ownership.

TIP can address these barriers, but only through intentional design choices in the negotiation and operationalization process. The three conditions we have identified - dedicated financing architecture, genuine country ownership structures, and mechanisms for advancing technologies through the valley of death - are fundamental requirements for breaking the cycle of planning without delivery that has characterized climate technology cooperation for too long.

The 2030 climate targets are no longer distant aspirations - they are rapidly approaching realities against which progress will be measured. Technology implementation is not one component of climate action: it is the means through which climate commitments translate into emissions reductions and enhanced resilience. Getting TIP right is therefore essential not just for the Technology Mechanism but for the credibility of the entire climate regime.

The path forward requires both optimism and realism. Optimism that TIP represents genuine institutional innovation and that the barriers to implementation, while substantial, are not insurmountable. Realism that success is not guaranteed, that past mechanisms have disappointed despite initial promise, and that transformative outcomes require sustained political commitment and adequate resources.

Brazil's hosting of COP30 provides an important opportunity to advance TIP's operationalization. As a Global South country with demonstrated capability in technology innovation, strong traditions of South-South cooperation, and leadership on climate action, Brazil is well-positioned to champion effective technology implementation as a COP30 priority.

The window for effective climate action is narrowing. TIP offers a chance to widen the bottleneck in climate technology implementation that has constrained progress for far too long. The question is whether the international community will seize this opportunity with the seriousness, resources, and design sophistication required. The evidence of 15 years suggests caution; the urgency of the climate crisis demands optimism. TIP must succeed because the alternative - continued planning without delivery - is no longer acceptable.

References

BUCHNER, B.; CLARK, A.; FALCONER, A.; MACQUARIE, R.; MEATTLE, C.; WETHERBEE, C.; JAVADI, S. Global landscape climate finance 2021. **Climate Policy Initiative.** 14 dec. 2021. Disponível em: *https://www.climatepolicyinitiative.org/publication/global-landscape-of-climate-finance-2021/*

BROWN, S. Putting Paris into practice: Foreign aid, national ownership, and donor alignment in Mali and Ghana**. WIDER Working Paper Series** Helsinki: UNU-WIDER, wp-2016-145. 2016.

CIMOLI, M.; DOSI, G.; STIGLITZ, J.E. Innovation and technological capabilities in developing countries: Catching up and closing the gap. **Cambridge Journal of Economics,** v. 43, n. 4, p. 895–898. 2019a. *https://doi.org/10.1093/cje/bez027*

CIMOLI, M.; DOSI, G.; STIGLITZ, J.E. **The Political economy of capabilities accumulation:** the past and future of policies for industrial development. Oxford University Press. 2019b. *https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199235261.003.0001*

CLIMATE POLICY INITIATIVE. **The State of climate finance in Africa:** climate finance needs of african countries. San Francisco: CPI. 2022. Disponível em: *https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2022/06/Climate-Finance-Needs-of-African-Countries-1.pdf*

CLIMATE TECHNOLOGY CENTRE & NETWORK – CTCN. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) and United Nations Environment Program (UNEP). **CTCN Progress report 2022.** 2022. Disponível em: *https://www.ctc-n.org/resources/2022-2023-ctcn-progress-report*

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO; United Nations Development Programme – UNDP. **Integrating agriculture in national adaptation plans: Kenya case study.** Rome: FAO. 2017. Disponível em: *https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/bfabe21e-9c9a-4523-b213-a4f72a6480cd/content*

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. **Cooperação internacional em tempos de pandemia:** relatório Cobradi 2019-2020. 2022. Disponível em: *http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/10920*

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Financing clean energy transitions in emerging and developing Economies.** 2022. Disponível em: *https://iea.blob.core.windows.net/assets/6756ccd2-0772-4ffd-85e4-b73428ff9c72/FinancingCleanEnergyTransitionsinEMDEs_WorldEnergyInvestment2021SpecialReport.pdf*

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Net zero by 2050:** a roadmap for the global energy sector. 2023. Disponível em: *https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050*

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change 2022:** Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the sixth assessment report. Cambridge University Press, 2022. Disponível em: *https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/*

LEE, W.-J.; MWEBAZA, R. New strategy for innovative RD&D in view of stakeholder interaction during climate technology transfer. **Sustainability,** v. 14, n. 14, p. 8363. 2022. Disponível em: *https://www.mdpi.com/2071-1050/14/14/8363/pdf?version=1657263790*

MABEE, W.E.; MANNION, J.; CARPENTER, T. Response to Weitzel on our paper "Comparing the feed-in tariff incentives for renewable electricity in Ontario and Germany". **Energy Policy,** v. 40, C. p. 480–489, 2012. Disponível em: *http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511008676*

MEDICINES PATENT POOL - MPP. **Homepage.** 2024. Disponível em: *https://medicinespatentpool.org/*

MENDOZA, N.; MATHAI, J.; FORBUSH, D.; BOREN, B.; WEBER, J.; ROBERTS, J.; CHARTRAND, C.; FINGERSH, L.; GUNAWAN, B.; PEPLINSKI, W.; PREUS, R.; ROBERTS, O. **Developing technology performance level assessments for early-stage wave energy converter Technologies.** NREL Conference Paper, NREL/CP-5700-80455, oct. 2021. Disponível em: *https://docs.nrel.gov/docs/fy22osti/80455.pdf*

NOR, M.I. Investigating donor fulfilment in global climate finance: the role of EU commitment, **Frontiers in Climate**, v. 7, 2025. Disponível em: *https://www.frontiersin.org/journals/climate/articles/10.3389/fclim.2025.1629509/full*

PANDEY, N.; DE CONINCK, H.; SAGAR, A.D. Beyond technology transfer: Innovation cooperation to advance sustainable development in developing countries. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment,** v. 11, n. 2, p. e422. 2022. Disponível em: *https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wene.422*

PENNA, C.C.R.; MAZZUCATO, M.; SANTOS, G.D.O. Systemic capacities and capabilities for mission-oriented innovation policies: a novel framework and a case study of Brazil's Inova program, *UCL* **Institute for Innovation and Public Purpose, Working Paper Series,** IIPP WP 2025-02. 2025. Disponível em: *https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10210993/1/Penna_systemic_capacities_and_capabilities.pdf*

PENNA, C.C.R.; SCHOT, J.; STEINMUELLER, W.E. Transformative investment: New rules for investing in sustainability transitions, **Environmental Innovation and Societal Transitions**, v. 49, p. 100782. 2023. Disponível em: *https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/437081/1-s2.0-S2210422423000928-main.pdf?sequence=1*

PINO, B.A. A Cooperação triangular e as transformações da Cooperação Internacional para o Desenvolvimento. **Texto para Discussão No. 1845**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea). 2013. Disponível em: *https://repositorio.ipea.gov.br/items/47da1bd2-ec14-4da2-a082-be35285da516*

SCHUBERT, T.; DAROLD, D.; WILL, M. Measuring the causal economic effects of scientific research: Evidence from the staggered foundation of the SENAI innovation institutes in Brazil. **Discussion Papers Innovation Systems and Policy Analysis,** n. 87. 2024. Disponível em: *https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/595cc326-18b5-4a44-a601-726e16975fc1/content*

SCHUMACHER, E.F. **Small is beautiful**: economics as if people mattered. New York: Harper & Row. 1973. Disponível em: *https://www.daastol.com/books/Schumacher%20(1973)%20Small%20is%20Beautiful.pdf*

SERVIÇO NACIONAL DA INDÚSTRIA – SENAI; CENTRO INTEGRADO DE MANUFATURA E TECNOLOGIA - CIMATEC. (n.d.). **Why research and innovate?** Disponível em: *https://www.senaicimatec.com.br/en/pesquisa-e-inovacao/*

STIGLITZ, J.E.; GREENWALD, B. **Creating a learning society:** a new approach to growth, development, and social progress. Columbia University Press. 2014. 680 p.

UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE - UNCC. TECHNOLOGY EXECUTIVE COMMITTEE - TEC. **Implementation of technology needs assessments:** Linkages between the technology needs assessment process and the nationally determined contribution process. UNFCCC. 2022. Disponível em: *https://unfccc.int/ttclear/misc_/StaticFiles/gnwoerk_static/tec_tnandclinkages/81d273555c4749438d1eaf6acacd9e52/e6fc4ce869ba43f8bc496586c48caf81.pdf*

UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE- UNCC. TECHNOLOGY EXECUTIVE COMMITTEE - TEC. **Kenya Climate Innovation.** 2023a. Disponível em: *https://unfccc.int/ttclear/misc_/StaticFiles/gnwoerk_static/TEC_NSI/37cd8b96633a4ef2b6b0d10c21f06dec/86c19182d6b4408ab8900222c8bda673.pdf*

UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE - UNCC. TECHNOLOGY EXECUTIVE COMMITTEE - TEC. **Monitoring and evaluation of the work of the technology mechanism:** results of the UNFCCC survey for national designated entities. 2024. Disponível em: *https://unfccc.int/ttclear/misc_/StaticFiles/gnwoerk_static/tn_meetings/a9d1402cbd9a457e9962ba7664d55330/33baeab873e64d93b1d96557b0c6bac3.pdf*

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME - UNEP. **Emissions gap report 2022:** The closing window – Climate crisis calls for rapid transformation of societies. 2022. Disponível em: *https://unepccc.org/tna-v-workshop-seeks-to-upscale-finance-to-bridge-policy-and-implementation/*

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME – UNEP; Copenhagen Climate Centre - CCC. **Technology needs assessment global workshop seeks to upscale finance to bridge policy and implementation.** 2025. Disponível em: *https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/40874/EGR2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y*

UNITED NATIONS TRADE AND DEVELOPMENT - UNCTAD. **Transfer of technology:** selected issues. 1985. Disponível em: *https://unctad.org/system/files/official-document/psiteiitd28.en.pdf*

UNITED NATIONS TRADE AND DEVELOPMENT - UNCTAD. **Technology and Innovation Report 2021:** Catching Technological Waves – Innovation with Equity. 2021. Disponível em: *https://unctad.org/webflyer/technology-and-innovation-report-2021*

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM - UNDP. **The Next frontier:** human development and the anthropocene (Human Development Report 2020). 2020. Disponível em: *http://report2020.archive.s3-website-us-east-1.amazonaws.com/*

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE - UNFCCC. **Adoption of the Paris Agreement**: Report No. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. 2015 Disponível em: *https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf*

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE - UNFCCC. **Elaboration of the Technology Framework under Article 10, paragraph 4, of the Paris Agreement.** Report No. FCCC/CP/2019/6/Add.1. 2019. Disponível em: *https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cp24_auv_cop_4_TF.pdf*

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE - UNFCCC. **Fourth synthesis report on technology needs identified by Parties not included in Annex I to the Convention**. FCCC/SBI/2020/INF.1. 2020. Disponível em: *https://unfccc.int/sites/default/files/resource/sbi2020_inf.01.pdf*

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE - UNFCCC. **Synthesis report on the implementation of the framework for meaningful and effective action to enhance the implementation of Article 10, paragraph 5, of the Paris Agreement.** FCCC/SB/2022/INF.3. 2022.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE - UNFCCC. **Synthesis Report on the Technical Dialogue of the First Global Stocktake.** FCCC/SB/2023/7. 2023a. Disponível em: *https://unfccc.int/sites/default/files/resource/sb2023_09E.pdf*

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE - UNFCCC. **Decisions adopted by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement (CMA.5).** Decision 1/CMA.5. 2023b. Disponível em: *https://unfccc.int/documents*

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. **New collective quantified goal on climate finance.** Decision -/CMA.6 (Advance Unedited Version). Baku: 2024a. Disponível em: *https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2024_17a01E.pdf*

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE - UNFCCC. **Technology implementation programme.** Draft negotiating text**.** DT.DD.CMA6.i12b.2. 2024b. Disponível em: *https://unfccc.int/documents/644944*

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE - UNFCCC. **Draft decision -/CMA.7: Technology implementation programme (**Version 19/6/2025). 2025. Disponível em: *https://unfccc.int/sites/default/files/resource/TIP_dt_sb62_0.pdf*

UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION - UNIDO. **Accelerating clean energy through industry:** UNIDO's approach to sustainable industrial development. 2020. Disponível em: *https://www.unido.org/sites/default/files/2017-08/REPORT_Accelerating_clean_energy_through_Industry_4.0.Final_0.pdf*

UNITED NATIONS - UN. **Paris Agreement.** Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 2016. Disponível em: *https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf*

WILL, M.; KOHL, H.; ORTH, R. *et al.* Building up a national network of applied R&D institutes in an emerging innovation system. **Production,** v. 30, p. e20190151. 2020. Disponível em: *https://www.redalyc.org/journal/3967/396762077009/html/*

WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION - WIPO. **Exchanging value:** Negotiating technology licensing agreements, 2010. Disponível em: *https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/licensing/906/wipo_pub_906.pdf*



O CGEE, consciente das questões ambientais e sociais, utiliza papéis com certificação (Forest Stewartdship Council®) na impressão deste material. A certificação FSC® garante que a matéria-prima é proveniente de florestas manejadas de forma ecologicamente correta, socialmente justa e economicamente viável, e outras fontes controladas.
Impresso na Gráfica Coronário - Certificada na Cadeia de Custódia - FSC

cgee

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Ciência, Tecnologia e Inovação







ISSN 1413-9375