

FAPESP 60 Anos: A Ciência no Desenvolvimento Nacional

60 Years of FAPESP:
Advancing Science
for National
Development



Uma homenagem da
Academia de Ciências do Estado de São Paulo
A tribute from the São Paulo State Academy of Sciences



Capítulo 2

Mudanças climáticas globais: seus impactos e estratégias de mitigação e adaptação

Chapter 2
Global climate change: impacts and mitigation and adaptation strategies

INTRODUÇÃO
As mudanças climáticas provocam fortes impactos no Brasil e no planeta como um todo e é urgente entender melhor como são afetados os ecossistemas brasileiros, a economia, a infraestrutura, as cadeias produtivas, a biodiversidade, a saúde, entre outros aspectos. É fundamental, pois, aumentar a nossa resiliência socioambiental. Para além das suas implicações intrín-

<https://doi.org/10.4322/978-65-86819-27-4.1000002>
 Exceto onde indicado de outra forma, este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença [Creative Commons Attribution-NonCommercial](#), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais e que o trabalho original seja corretamente citado.
Except where indicated otherwise, this is an Open Access chapter distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial](#) license which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

secas, as mudanças climáticas podem ser vistas, também, como oportunidades para importantes transformações socioeconômicas e para aprimoramentos no desenvolvimento tecnológico de todos os setores da sociedade, como a indústria, o agronegócio, o sistema energético, os transportes etc., visando à transição para um modo de vida mais sustentável. Estes esforços devem alinhar preservação da biodiversidade e redução de nossas desigualdades sociais. O Brasil tem condições potenciais de ser competitivo em uma economia de baixo carbono desde que aproveite o potencial de mudar sua matriz energética sem a utilização de combustíveis fósseis, eliminando o desmatamento e diminuindo as emissões de gases de efeito estufa (GEE) do setor agropecuário. Essencial também induzir ações como a restauração ecológica e conservação da biodiversidade em

INTRODUCTION
Climate change generates significant impacts for Brazil and the planet as a whole. Clearly understanding how Brazilian ecosystems, the economy, infrastructure, production chains, biodiversity, and health among other aspects are being affected is urgent. Consequently, increasing our socio-environmental resilience becomes essential. Beyond its intrinsic implications, climate change can also be seen as an opportunity for significant socio-economic transformation and for streamlining technological developments in diverse social sectors, including industry, agribusiness, energy systems, transportation, etc., seeking to transition to a more sustainable way of life. Brazil is in a position to be competitive in a low carbon economy as long as it exploits possibilities for transforming its energy mix without fossil fuel use, eliminating deforestation, and reducing greenhouse gas emissions (GGE) stemming from the farming sector. It is also necessary to encourage measures such as ecological rehabilitation and

biodiversity conservation in all Brazilian biomes. This can be achieved through economic growth and a reduction in social inequality.
Notably, climate change is already with us, and it is no longer a perspective for the future. It is driving alterations in rainfall patterns, temperature, coastal and inland water levels, and chemistry, plant phenology, ecosystem functioning, and biodiversity distribution, among other impacts. These changes interact with one another and with multiple social and environmental stressors that can intensify them. However, many of these dimensions of climate change and their interactions need to be better understood through close collaboration between diverse research areas in academia and diverse social sectors, including political leadership, institutional and corporate actors, social groups, communities, and minorities.
The most recent Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) reports show that Brazil is particularly vulnerable to climate change. The warming

todos os biomas brasileiros. Isso pode ser feito com crescimento econômico e redução das desigualdades socioeconômicas.
Importante salientar que a mudança do clima já está hoje entre nós, não é mais uma perspectiva para o futuro. Mudanças climáticas vêm influenciando alterações no regime de chuvas, na temperatura, nível e química de águas costeiras e interiores, mudanças na fenologia das plantas, funcionamento de ecossistemas e distribuição da biodiversidade, entre muitos outros impactos. Essas mudanças interagem entre si e com “múltiplos estressores” sociais e ambientais que podem amplificar seus impactos. Porém, muitas dessas dimensões das mudanças climáticas e suas interações precisam ser mais bem compreendidas a partir da colaboração estreita entre as diversas linhas de pesquisa na academia e múltiplos setores da sociedade,

As mudanças climáticas provocam fortes impactos no Brasil e no planeta como um todo e é urgente entender melhor como são afetados os ecossistemas brasileiros, a economia, a infraestrutura, as cadeias produtivas, a biodiversidade, a saúde, entre outros aspectos.



autores/authors
Paulo Artaxo¹
Mercedes Bustamante²
David Montenegro Lapola³
Pedro Leite da Silva Dias¹
Gabriela Marques di Giulio¹

¹ Universidade de São Paulo (USP), Brasil.
² Universidade de Brasília (UnB), Brasil.
³ Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Brasil.

PETMAL / ISTOCKPHOTO.COM

incluindo lideranças políticas, atores institucionais e empresariais, grupos sociais, comunidades e minorias.

Os últimos relatórios do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) mostram claramente que o Brasil é um país particularmente vulnerável às mudanças climáticas, onde o aquecimento observado nas últimas décadas supera significativamente o aquecimento médio do planeta. Os extremos climáticos observados em todas as regiões do país nos últimos 20 anos, por exemplo, trouxeram à tona a necessidade de soluções para minimizar os problemas socioeconômicos advindos das secas mais fortes e frequentes e de inundações extremas em grandes áreas. O setor agropecuário é também particularmente vulnerável a alterações no regime de chuvas. Quanto e quando chove é fundamental para a produtividade agrícola, o que pode trazer insegurança alimentar ou instabilidade econômica à nossa população. A geração de energia baseada na hidroeletricidade é vulnerável ao regime de chuvas, podendo trazer insegurança energética ao país e, embora tida como uma energia limpa, colabora na emissão de metano para a atmosfera. Temos 8.500 km de áreas costeiras, cobrindo 17 estados e mais de 400 municípios, com várias cidades de grande porte, o que nos torna vulneráveis, ainda, ao aumento do nível do mar e à acidificação de suas águas, que impacta o setor pesqueiro.

A FAPESP, por meio do Programa de Pesquisas em Mudanças Climáticas, realiza um trabalho de coordenação de uma vasta agenda científica voltada a entender os processos associados à mudança do clima e avaliar as suas causas e os seus impactos, fornecendo subsídios científicos para encontrar soluções e apoiar políticas públicas baseadas em evidências científicas e gerar novos conhecimento. Aumentar a resiliência socioambiental do país a eventos climáticos extremos, às alterações no ciclo hidrológico e demais mudanças climáticas em andamento é fundamental. O programa de biodiversidade (BIOTA) e o programa de bioenergia (BIOEN) também auxiliam nesta agenda científica.

Gerar novos conhecimento e criar uma massa crítica de pesquisadores nas diversas ciências naturais, de saúde, tecnológicas e sociais, para subsidiar ações que visem à mitigação de emissões e adaptação às mudanças climáticas, além da recuperação dos serviços ecossistêmicos, são fundamentais na melhoria da relação sociedade-meio ambiente. É preciso facilitar o acesso e uso do conhecimento científico gerado, de modo a impulsionar e acelerar as mudanças necessárias, integrando a sociedade nas decisões a serem tomadas.

É, portanto, fundamental auxiliar o país a desenvolver estratégias baseadas em ciência para que o Brasil possa cumprir suas obrigações internacionais (as NDC – *Nationally Determined Contributions*) associadas ao Acordo de Paris e à Agenda 2030. Os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU fornecem um guia de como nossa sociedade pode se tornar mais sustentável, justa e resiliente (Figura 1). As mudanças climáticas constituem o ODS 13, mas sem um clima estável e previsível, muitos dos demais ODS podem ser impossíveis de serem atingidos. Muitos dos ODS dependem também de um sistema econômico mais justo e que respeite os limites da exploração do meio ambiente, além de levar em conta a questão da justiça climática. Os mais pobres e mais vulneráveis serão os mais afetados, enquanto os 10% mais ricos do planeta são responsáveis por mais de 50% das emissões atuais de gases de efeito estufa.

O ESTADO ATUAL DAS PESQUISAS EM MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O forte impacto do nosso sistema socioeconômico no planeta tem levado a comunidade científica a considerar, após o Holoceno, uma nova era geológica: o Antropoceno – em que o homem é um dos principais agentes transformadores de nosso planeta. O crescimento da população humana mundial, que poderá alcançar entre 9 e 10 bilhões de pessoas em 2050, nos coloca frente a um dos maiores desafios do século 21: manter a provisão da qualidade

observed in Brazil over recent decades is significantly greater than the average warming for the planet. Over the last 20 years, climate extremes reported in all regions of the country have emphasized the need for solutions to minimize socio-economic problems stemming from strong and frequent droughts and extreme floods over large areas. The agribusiness sector is also particularly vulnerable to alterations in rainfall patterns and increase in climate extremes. How much and when it rains is critical for agricultural productivity, affecting food insecurity and economic instability for the Brazilian population. Hydroelectric energy generation is vulnerable to rainfall patterns, possibly leading to energy insecurity for Brazil. Also, although it is viewed as a clean energy source, it contributes to methane emissions into the atmosphere. Brazil has 8,500 km of coastal area in 17 states and more than 400 municipalities, including numerous large cities, making it vulnerable to sea-level rise and water acidification that impacts the fisheries sector.

Through the Climate Change Research Program, FAPESP coordinates a vast scientific undertaking focused on understanding processes associated with climate change and evaluating its causes and impacts. The program provides scientific assistance to find solutions and underpin public policy based on scientific evidence, as well as to generate new knowledge. It is of utmost importance to increase Brazil's socio-environmental resilience to extreme climate events, to alterations in the hydrological cycle, and to other climate changes currently underway. The biodiversity (BIOTA) and bioenergy (BIOEN) programs also support this scientific agenda.

Generating new knowledge and creating a critical mass of researchers in diverse natural, health, social and technological sciences is fundamental to assist in adaptation and emission mitigation measures and recover ecosystem services and improve the society-environment relationship. It is necessary to facilitate access to and use the scientific knowledge generated to drive and accelerate necessary changes, involving society in the decision-making process.

Therefore, it is crucial to help the country develop strategies based on science so that Brazil can meet its international obligations (such as Nationally Determined Contributions - NDC) associated with the Paris Agreement and the 2030 Agenda. The 17 Sustainable Development Goals (SDGs) of the United Nations (UN)



Figura 1. Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, que são guias para a construção de uma nova sociedade, mais sustentável, justa e resiliente. As mudanças climáticas constituem o ODS 13, mas vários ODS não poderão ser atingidos sem um clima estável e previsível. Fonte: United Nations (2022). Textos em português traduzidos do inglês. *Figure 1.* The 17 Sustainable Development Goals of the UN, grounded in constructing a new, more sustainable, just, and resilient society. SDG 13 deals with climate change, however, numerous other SDGs would be unachievable without a stable, predictable climate. Source: United Nations (2022). Portuguese texts translated from English.

provide an outline for how our society can become more sustainable, just, and resilient (Figure 1). Climate change is considered by SDG 13. However, many of the other SDGs are impossible to meet without a stable and predictable climate. Many SDGs also depend on a more equitable economic system that respects environmental exploitation limits and takes into account the issue of climate justice. The poorest and most vulnerable are the most affected, while the 10% richest are responsible for more than 50% of current greenhouse gas emissions.

ambiental e possibilitar acesso justo a recursos básicos, como água, alimentos e energia, garantindo a segurança e equidade em um cenário de mudanças climáticas. Nos últimos 50 anos, 14 dos 18 serviços ambientais avaliados entraram em declínio, e seus impactos são distribuídos de maneira socialmente desigual entre e dentro de países (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2019). Os serviços ecossistêmicos englobam todos os mate-

riais que consumimos providos pelos ecossistemas, sejam alimentos (frutos, raízes, animais, mel, vegetais), matérias-primas para construção e combustível (madeira, biomassa, óleos de plantas), água potável (qualidade e quantidade) e recursos genéticos, entre outros. O aumento na demanda e a pressão sobre os já escassos recursos naturais serão inevitáveis, com impactos econômicos significativos.

O Programa FAPESP de Pesquisa sobre Mudanças Climáticas Globais (Fundação



THE CURRENT STATE OF CLIMATE CHANGE RESEARCH

The profound impact of our socio-economic system on the planet has led the scientific community to consider a new geological era following the Holocene: the Anthropocene – wherein man becomes one of the main agents of transformation on the planet. Global human population growth, which could reach between 9 to 10 billion people by 2050, places us face to face with one of the greatest challenges of the 21st century: maintaining environmental quality and facilitating equal access to basic resources – such as food, water and energy – to guarantee safety and equality in the climate change context. Over the last 50 years, 14 of the 18 environmental services evaluated have begun declining, and their impacts are distributed in a socially unequal manner both between and within countries (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2019). Ecosystem services include all the materials that we consume provided by ecosystems, such as food (fruits, roots, animals, honey, vegetables), raw materials for construction and fuel (wood, biomass, plant oils), drinkable water (quality and quantity), and genetic resources, amongst others. Increased demand and pressure on already scarce natural resources will inevitably bring significant economic impacts.

FAPESP's Global Climate Change Research Program (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 2022) has a scientific agenda that seeks to study critical processes for our ecosystems, as well as find solutions that can most effectively implement the 17 SDGs and the Brazilian Paris Agreement commitments. FAPESP Climate Change Program works with FAPESP BIOTA (focused on biodiversity preservation) and BIOEN (focused on bioenergy) programs. FAPESP Climate Change Program has already supported hundreds of projects over 15 years from all knowledge areas. It is important to highlight the relevance of interdisciplinary projects and those associated with economic and social sciences.

Climate change has strong associations with the biodiversity loss that we observe in nearly all terrestrial ecosystems and in the marine environment (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2019). Ecosystems' resilience and their ability to respond to change depend mainly on their biodiversity. Alterations observed in precipitation rates and their seasonality, as well as temperature increases, are affecting ecosystem functions. Climate change, for example, can produce discrepancies between

the flowering season and pollinator activity, affecting forestry and cultivation productivity with still unforeseen consequences for biodiversity maintenance and food production. Climate change affects photosynthesis and productivity of ecosystem patterns, modifying hydrological cycles and carbon dynamics. The synergistic effects of land-use changes, including fragmentation and reductions of native vegetation and changes to climate, can increase pest action, thereby diminishing pollinators and requiring mitigation or adaptation measures to guarantee productivity for many food cultivars in Brazil and around the world. Such measures can increase uncertainty and make more expensive the production of a wide range of food crops that depend on pollinators while also limiting their productivity, thereby affecting food security.

Figure 2 shows how strong associations between climate change, human systems, and ecosystem services can be transformed—considering issues of governance, economics, and new technologies, a more resilient, sustainable, and just future can be built, preserving ecosystem services using adequate emissions and adaptation strategies. This process is associated with SDGs, given that we must consider basic population needs (education, health, gender equality, poverty and hunger eradication, clean water, and others) while simultaneously respecting the limited availability of natural resources on our planet.

Nowadays, we can see that in many respects, climate change impacts are rapidly accelerating in Brazil and around the world. In particular, social impacts worsen conditions for more vulnerable populations with less access to basic services such as good quality food, health, energy, housing, and sanitation. Science is a basic tool to outline efficient impact reduction measures, underpinning mitigation strategies to reduce emissions and adaptation actions (World Economic Forum, 2022). Based on ongoing high-quality research, interdisciplinary science is important to this process (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022). The challenges involved in reducing human action impacts on the environment, with a need for sustainable development and social inequality reductions, depend on achieving robust scientific results. However, it is notable that the greater part of detection and attribution for connections between ecosystems and climate change in recent decades has been obtained by analyzing long-term observations in the Northern Hemisphere. A lack of data and research on social and health dimensions of climate

de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 2022) tem uma agenda científica que visa estudar processos críticos para nossos ecossistemas e também encontrar soluções que possam implementar da melhor maneira possível os 17 ODS e os compromissos brasileiros no Acordo de Paris. O FAPESP Mudanças Climáticas trabalha em conjunto com os programas BIOTA (voltado à preservação da biodiversidade) e BIOEN (voltado à bioenergia) da FAPESP. O Programa FAPESP Mudanças Climáticas já apoiou centenas de projetos ao longo dos últimos 15 anos, em todas as áreas do conhecimento. Importante salientar a relevância dos projetos interdisciplinares e os associados a ciências sociais e econômicas.

As mudanças climáticas têm fortes ligações com a perda da biodiversidade que observamos em praticamente todos os ecossistemas terrestres e no ambiente marinho (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2019). A resiliência dos ecossistemas e sua capacidade de reagir a mudanças dependem em grande parte de sua biodiversidade. As alterações observadas na taxa de precipitação e sua sazonalidade e no aumento de temperatura estão afetando o funcionamento dos ecossistemas. Mudanças climáticas podem, por exemplo, levar a desencontros entre a época da floração e a atividade dos polinizadores, afetando a produtividade da floresta e das culturas, com consequências ainda imprevisíveis para a manutenção da biodiversidade e da produção de alimentos. As mudanças climáticas afetam os padrões ecossistêmicos da fotossíntese e da produtividade, podendo modificar os ciclos hidrológicos e a dinâmica do carbono. Os efeitos sinérgicos da mudança do uso da terra, incluindo a fragmentação e redução de vegetação nativa e mudanças do clima, podem aumentar a ação de pragas, reduzindo os polinizadores e exigindo medidas de mitigação ou adaptação para garantir a produtividade de muitas culturas alimentares no Brasil e ao redor do mundo. Essas medidas podem aumentar as incertezas e

As mudanças climáticas têm fortes ligações com a perda da biodiversidade que observamos em praticamente todos os ecossistemas terrestres e no ambiente marinho.

encarecer a produção de uma grande gama de alimentos que dependem de polinizadores, ao mesmo tempo que limitam a produtividade dessas culturas, afetando a segurança alimentar.

A Figura 2 mostra diagramas de como poderemos transformar as fortes associações entre as mudanças climáticas, os sistemas humanos e os serviços ecossistêmicos. Levando em conta as questões de governança, finanças e novas tecnologias poderemos construir um futuro mais resiliente, sustentável e justo, preservando os serviços ecossistêmicos através de estratégias adequadas de adaptação e mitigação aos ODS, já que temos que atender às necessidades básicas da população (educação, saúde, igualdade de gênero, erradicação da pobreza, fome zero, água limpa e outros) e ao mesmo tempo respeitar os limites da disponibilidade dos recursos naturais de nosso planeta.

Hoje podemos ver, em muitos aspectos, que os impactos das mudanças climáticas estão se acelerando rapidamente no Brasil e em nosso planeta. Os impactos sociais, em especial, agravam a condição das populações mais vulneráveis e com menor acesso a serviços básicos como alimentação de qualidade, saúde, energia, habitação e saneamento. A ciência é uma ferramenta básica para que sejam estruturadas medidas eficientes na redução desses impactos, impulsionando ações de mitigação para reduzir emissões e de adaptação (World Economic Forum, 2022). A ciência interdisciplinar, fundamentada na pesquisa de qualidade e continuada, é central nesse processo (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022). Os desafios envolvidos na redução do impacto das ações humanas no ambiente, alinhados à necessidade do desenvolvimento sustentável e da redução de desigualdades sociais, passam pelo desenvolvimento de sólidos resultados científicos. Contudo, é importante salientar que a maior parte da detecção e atribuição acumulada sobre conexões entre ecossistemas e mudanças do clima nas últimas décadas tem sido derivada da análise de observa-

ções de longo prazo no Hemisfério Norte. A carência de dados e de pesquisas sobre as dimensões sociais e de saúde das mudanças climáticas são ainda mais pronunciadas. Séries temporais de dados físicos e de biodiversidade em todos os biomas brasileiros e no Atlântico Sul são necessárias, incluindo dados paleoclimáticos.

Ainda assim, é preciso reconhecer que, no Brasil, a ciência tem avançado a passos largos, mostrando um dinamismo importante em estudos interdisciplinares e transdisciplinares, cujos resultados podem subsidiar políticas públicas, seja para as distintas regiões do país, seja em setores específicos como o de água, produção de alimentos, transporte e geração e consumo de energia.

O Brasil está entre os países que despertam considerável interesse na questão das mudanças climáticas. Por exemplo, a floresta amazônica desempenha papel importante como estoque de carbono e explicita questões urgentes relacionadas ao desmatamento e aos serviços ecossistêmicos. No setor de transporte rodoviário, cabe destacar o papel crítico de biocombustíveis como estratégia de mitigação. Ainda no setor energético, temos uma matriz com forte peso na produção de hidroeletricidade.

O Brasil é signatário do Acordo de Paris e dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) e sua comunidade científica tem contribuído fortemente com avanços científicos capazes de pautar as esferas das políticas públicas e estratégias de desenvolvimento socioeconômico, além de orientar os tomadores de decisão quanto ao desenvolvimento sustentável do país. As ações de bases científicas para atender os desafios impostos pela alteração climática e ambiental passam pelo estabelecimento de métricas e referências, de forma a contribuir na formulação de estratégias regionais e nacionais de detecção/atribuição, mitigação e adaptação aos seus efeitos adversos.

O Brasil mostra vulnerabilidades importantes nas áreas ambiental e climática. O observado aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos tem impactado sobremaneira nossa população,

change is even more pronounced. Time series for physical and biodiversity data for all Brazilian and South Atlantic biomes are necessary, including paleoclimatic data.

Even so, it is evident that science has made significant progress in Brazil, with inter and transdisciplinary studies presenting noteworthy dynamism. The results of such works can inform public policy, both for specific Brazilian regions and for sectors such as water, food production, transportation, and energy consumption and generation.

Brazil numbers among those countries receiving considerable attention due to the climate change issue. The Amazon Forest, for example, plays a key role as a carbon store and raises urgent questions regarding deforestation and ecosystem services. The crucial role of biofuels in the highway transportation system as a mitigation strategy is also noteworthy. Brazil has an energy mix featuring a strong emphasis on hydroelectric production in the energy sector.

Brazil is a signatory of the Paris Agreement and the Sustainable Development Goals (SDGs). Furthermore, its scientific community has strongly contributed to scientific advances capable of grounding public policy and socio-economic development strategies and guiding decision-making for the sustainable development of Brazil. Scientifically informed measures to deal with challenges generated by environmental and climate alterations rely on the establishment of metrics and references to contribute to the formulation of regional and national strategies of detection/attribution, mitigation, and adaptation to adverse climate change outcomes.

Brazil presents significant vulnerabilities in environmental and climatic areas. The increasing frequency of extreme climate events observed has excessively impacted our population, economy, and ecosystem functioning. Extreme climate events affect agricultural production, coastal infrastructure, and hydrological resource availability, among many other outcomes. Particularly in coastal cities, significant population density, infrastructure shortfalls, high pollution levels, degradation of rivers and wetland areas, combined with the negative effects of climate change, such as rising sea levels and occurrence of extreme events, threaten important socio-economic activities that depend on the oceans, such as tourism, fishing, and international commerce.

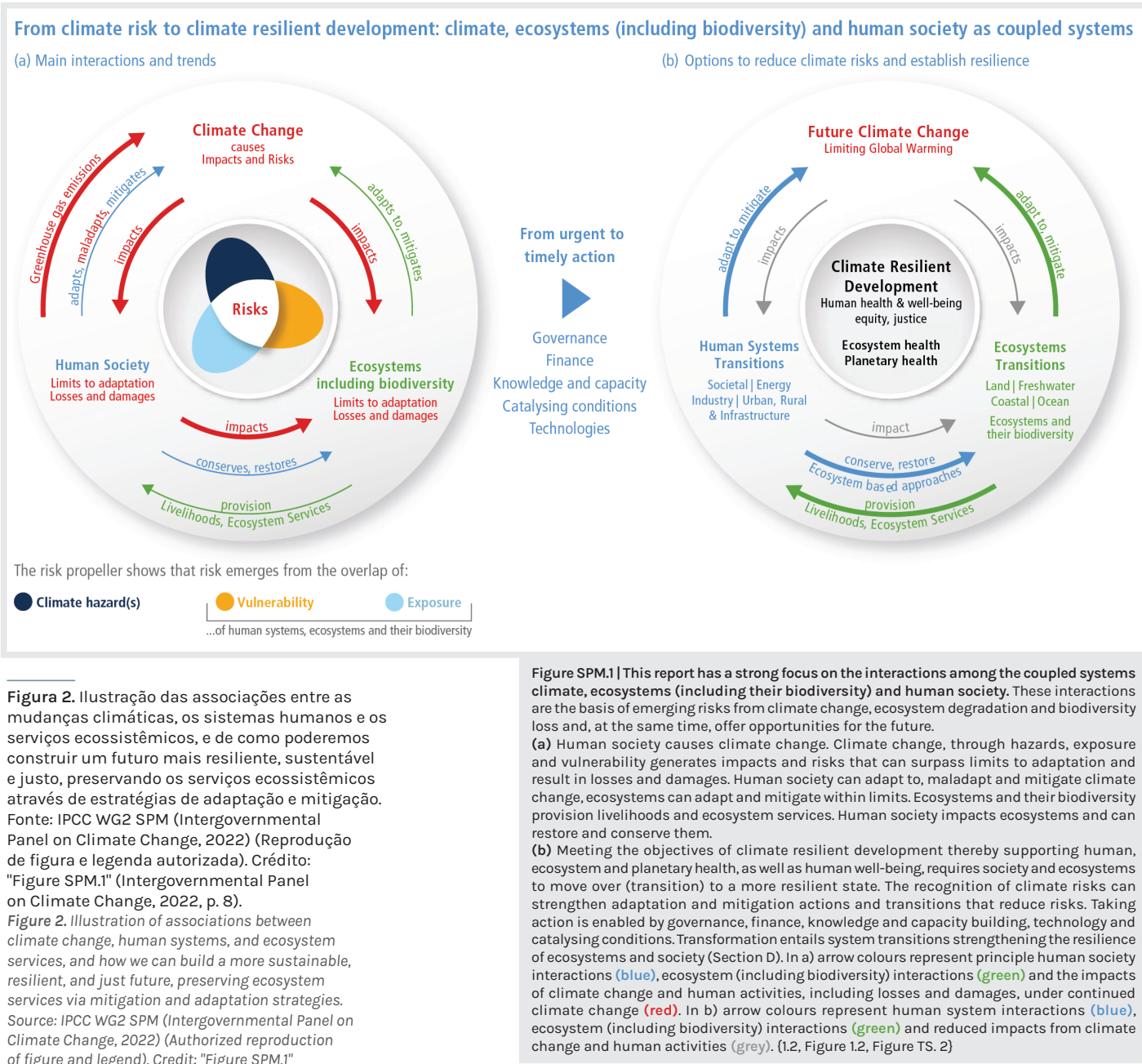


Figura 2. Ilustração das associações entre as mudanças climáticas, os sistemas humanos e os serviços ecossistêmicos, e de como poderemos construir um futuro mais resiliente, sustentável e justo, preservando os serviços ecossistêmicos através de estratégias de adaptação e mitigação. Fonte: IPCC WG2 SPM (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022) (Reprodução de figura e legenda autorizada). Crédito: "Figure SPM.1" (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, p. 8).

Figure 2. Illustration of associations between climate change, human systems, and ecosystem services, and how we can build a more sustainable, resilient, and just future, preserving ecosystem services via mitigation and adaptation strategies. Source: IPCC WG2 SPM (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022) (Authorized reproduction of figure and legend). Credit: "Figure SPM.1" (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, p. 8).

Issues related to land use and cover changes are vital for the research associated with global environmental changes, especially due to accelerated alterations over recent decades with significant environmental and social impacts. Brazilian biomes are distributed in large areas of the country and suffer uncontrolled land-use changes, with negative outcomes for ecosystems and global and regional climates.

Growing impacts on the urban environment, tourism, urban mobility, and

a economia e o funcionamento dos ecossistemas. Os eventos climáticos extremos impactam a produção agrícola, a infraestrutura costeira, a disponibilidade de recursos hídricos, entre muitos outros efeitos. Particularmente nas cidades costeiras, a alta densidade populacional, deficiências infraestruturais, altos níveis de poluição, degradação de rios e áreas úmidas, combinados com os efeitos negativos das mu-

danças climáticas, como elevação do nível do mar e ocorrência de eventos extremos, ameaçam importantes atividades socioeconômicas dependentes dos oceanos, como turismo, pesca e comércio internacional.

As questões relacionadas com as mudanças nos padrões de uso e cobertura do solo são de interesse central aos estudos relacionados às mudanças ambientais globais, em especial pelo acelerado processo

de alterações das últimas décadas, com fortes impactos ambientais e sociais. Os biomas brasileiros se distribuem em grandes áreas do país, sofrendo com processos desordenados de mudanças no uso do solo, com efeitos deletérios sobre os ecossistemas e o clima regional e global.

Impactos crescentes no ambiente urbano, turismo, mobilidade urbana e transportes são identificados na literatura e necessitam de soluções com base em informações robustas e baseadas em ciência. Com 84% da população brasileira vivendo em cidades, a sustentabilidade urbana é central, particularmente para garantir disponibilidade e acesso a água, energia, alimentos, saneamento, entre outros aspectos essenciais para manutenção da saúde e bem-estar dos indivíduos.

Em 2016, o Brasil ratificou o Acordo de Paris, comprometendo-se a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa em 37% até 2025, e 43% até 2030, em comparação com emissões verificadas em 2005, e a eliminar o desmatamento ilegal da Amazônia até 2025. O país também se comprometeu a aumentar a participação da bioenergia na sua matriz energética para 18% até 2030, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas, bem como alcançar uma participação de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030, além de uma redução em 10% no consumo de eletricidade (105 TWh em 2030). São metas que exigirão esforços consideráveis da ciência e da sociedade brasileira. Na COP-26, em Glasgow, em 2021, o Brasil adicionalmente se comprometeu a reduzir suas emissões de metano em 30% até 2030 e a eliminar o desmatamento da Amazônia até 2028.

Portanto, os objetivos para as pesquisas na próxima década devem estar voltados às questões contemporâneas, direcionando a ciência a produzir sólidas evidências científicas e abarcar estratégias que promovam transformações sociais em busca da sustentabilidade com os menores impactos econômicos e ambientais, de forma rápida e eficiente, focada no contexto brasileiro. Devemos responder aos desafios das

mudanças climáticas globais por meio do estímulo à geração do conhecimento para a consolidação de respostas práticas em todos os setores da sociedade brasileira.

DESAFIOS EM SETORES ESTRATÉGICOS

Algumas áreas de pesquisa requerem ações mais urgentes ou podem ser consideradas prioritárias por uma série de razões, que serão elencadas ao longo deste documento. A construção de uma sociedade minimamente sustentável vai requerer grandes esforços da sociedade, em todos os setores. Geração e consumo de energia, produção de alimentos, transportes, habitação, questões urbanas, funcionamento de ecossistemas são somente alguns destes tópicos prioritários.

Política energética para um desenvolvimento sustentável

Os desafios científicos e tecnológicos para reduzir emissões e manter o aquecimento global máximo em 1,5 a 2 graus Celsius, como estabelecido pelos países signatários do Acordo de Paris, implicam grandes transformações nos sistemas sociais, nas questões territoriais e de uso do solo, energia, infraestrutura e política industrial. O Brasil tem importantes vantagens estratégicas na área de energia, pois uma parcela significativa da sua matriz energética vem de fontes renováveis, como hidroeletricidade e biocombustíveis, e possui grande potencial de utilização das energias eólica (*onshore* e *offshore*) e solar, além de fontes marinhas como as ondas, marés e gradientes térmicos. Incorporar esse potencial no atual sistema energético nacional requer desenvolvimento de novos modelos de geração, distribuição e tarifação de energia, e incentivos para que o uso de energia renovável seja ampliado, em especial para a eólica e a solar. Novas oportunidades de criação de empregos, novos negócios e novas cadeias de suprimento com novas tecnologias poderão surgir. Ao mesmo tempo e na direção oposta há interesse crescente na incorporação de novas parcelas de combustíveis fósseis, especial-

transportation are identified in the literature and require solutions based on robust information grounded in science. With 84% of the Brazilian population living in cities, urban sustainability is key, particularly to guarantee availability and access to water, energy, food, and sanitation, among other aspects crucial to maintaining the health and well-being of individuals.

In 2016, Brazil ratified the Paris Agreement, committing to a 37% reduction in greenhouse gas emissions by 2025 and 43% by 2030, compared to 2005 levels. It also agreed to eliminate illegal deforestation in the Amazon by 2025. Brazil also committed to increasing the share of bioenergy in its energy mix to 18% by 2030, restoring and reforesting 12 million hectares of forest, and achieving a 45% participation of renewable energy in its energy mix by 2030. Furthermore, it committed to a 10% reduction in electricity consumption by 2030 (105 TWh in 2030). These goals will require considerable effort from Brazilian science and society. At COP-26, in Glasgow, in November 2011, Brazil also committed to a 30% reduction in methane emissions by 2030 and to eliminating deforestation of the Amazon by 2028.

Therefore, research objectives for the following decade should be focused on current issues, guiding science to rapidly and efficiently produce solid scientific evidence and adopt strategies. This can promote social transformation focused on the Brazilian context seeking sustainability alongside minimal economic and environmental impacts. We should respond to global climate change challenges by encouraging knowledge generation to underpin practical responses for all sectors of Brazilian society.

CHALLENGES FOR STRATEGIC SECTORS
Specific research areas require more urgent action or can be considered priorities for several reasons, which will be presented throughout this chapter. Creating a minimally sustainable society requires significant effort from all social sectors. Energy generation and consumption, food production, transportation, housing, urban issues, and ecosystem functioning are only some of these priority areas.

Energy policy for sustainable development
The scientific and technological challenges involved in reducing emissions and keeping maximum global warming to 1.5 to 2 degrees

Celsius, as established by the signatory countries for the Paris Agreement, imply significant transformations of social systems and territorial issues such as land use, energy, infrastructure, and industrial policy. Brazil has important structural advantages in the energy area since a significant portion of its energy mix comes from renewable sources, such as hydroelectricity and biofuels, and shows great potential for the use of wind (onshore and offshore) and solar energies, as well as marine sources such as wave, tidal and thermal gradients. Incorporating this potential into the current national energy system requires developing new energy generation, distribution, and pricing models and incentives for increased renewable energy use, especially for wind and solar. New job creation opportunities will emerge with new technologies, businesses, and supply chains. At the same time and in the opposite direction, there is growing interest in incorporating new fossil fuel resources, especially natural gas and petroleum, from pre-salt exploration. The apparent contradiction between evolving to renewable energy and expanding pre-salt exploration can be solved through strategies of using natural gas as a transition fuel, allowing the gradual insertion of large intermittent energy blocks, and the opportunity for CO₂ storage and subsequent use. IPCC scenarios to keep global warming to 1.5 °C are nearly all associated with advanced biomass using strategies for energy production and simultaneous carbon storage. These are the so-called BECCS strategies (bioenergy with carbon capture and storage) in which Brazil and especially São Paulo could be leaders. Efforts are necessary to improve our understanding of the impact of energy policy and technological changes in terms of greater resilience for the Brazilian economy and at the same time, reducing national greenhouse gas emissions. FAPESP Climate Change Program works in partnership with BIOEN on these important issues since biofuel use is one of Brazil's strategic pathways.

Understanding natural processes and environmental and climate modeling
Science has made significant progress in understanding the processes that regulate our planet's climate on all temporal and spatial scales (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). Modeling the terrestrial climate system is essential both to estimate climatic and environmental conditions at their multiple scales of spatiotemporal variability and as a tool for optimizing climate change adaptation measures in Brazil. Important

mente de gás natural e petróleo oriundos da exploração do pré-sal. A aparente contradição entre a evolução para as energias renováveis e a exploração do pré-sal pode ser resolvida através de estratégias de utilização do gás natural como combustível de transição, possibilitando a inserção gradativa de grandes blocos de energia intermitente, além da oportunidade de armazenamento de CO₂ e/ou sua posterior utilização. Os cenários do IPCC para restringir o aquecimento global a 1,5 °C são praticamente todos indissociáveis de estratégias avançadas de utilização de biomassa para a produção de energia e, ao mesmo tempo, armazenamento de carbono, a chamada estratégia BECCS (*bioenergy with carbon capture and storage*), na qual o Brasil, e São Paulo em especial, pode ser um protagonista. São necessários esforços para melhor compreensão dos impactos de mudanças em tecnologias e políticas energéticas no que se refere à maior resiliência da economia brasileira e, ao mesmo tempo, reduzir as emissões nacionais dos gases de efeito estufa. O Programa FAPESP de Mudanças Climáticas trabalha em parceria com o BIOEN nesta importante questão, pois o uso de biocombustíveis é um dos caminhos estratégicos para o Brasil.

A compreensão dos processos naturais e seu modelamento ambiental e climático

A Ciência fez progressos notáveis no entendimento de processos que regulam o clima de nosso planeta em todas as escalas temporais e espaciais (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). A modelagem do sistema climático terrestre é essencial tanto para estimar as condições climáticas e ambientais em suas diversas escalas de variabilidade espaço-temporal, quanto como ferramenta de aperfeiçoamento das ações de adaptação às mudanças climáticas no Brasil. Importantes setores socioeconômicos nacionais têm forte dependência da informação meteorológica e climática, como os da agropecuária, saúde pública, geração de energia, transportes, infraestrutura, entre outros. O planejamento e a operação nes-

Os desafios científicos e tecnológicos para reduzir emissões e manter o aquecimento global máximo em 1,5 a 2 graus Celsius, como estabelecido pelos países signatários do Acordo de Paris, implicam grandes transformações nos sistemas sociais, nas questões territoriais e de uso do solo, energia, infraestrutura e política industrial.



national socio-economic sectors, such as farming, public health, energy generation, transportation, and infrastructure, are strongly dependent on climate and meteorological data. Planning and operating these sectors are particularly sensitive to climatic and meteorological predictability on short to medium-range timeframes, including seasonal, interannual and decadal scales. Given the increase in extreme climate events and socio-economic dependency on climate, robust data for atmospheric predictability and oceans at the smallest temporal scales will be increasingly important.

Given that climate change adaptation measures are undertaken through high-investment structural initiatives, for example, increasing hydropower availability, improving atmospheric forecasting increases information quality and thereby reduces risk margins for decision making. Environmental modeling is an essential tool for studying how ecosystems react to climate change and identifying key processes for ecosystem preservation. As a research goal, we should encourage investigations that focus on reducing climate forecasting uncertainties at distinct temporal scales by: (a) improving numerical weather and climate models, and (b) using analysis techniques applying models and large volumes of data, and based on the use of artificial intelligence, neural networks, complex networks and other resources. This will reduce the bias of models based on physical principles and produce better estimates of uncertainties attributed to climate forecasts and projections. Another very important use of analysis techniques for large volumes of data involves attributing causes, and these strategically contribute to streamlined decision-making in Brazil. The particular characteristics of tropical climates are not always well represented in global climate models.

Rainfall is a great uncertainty for weather and climate forecasting models, notably in the case of large floods and inundations. Deep clouds usually produce rainfall in tropical regions with a large volume of ice in the upper part. However, the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA) has shown that there are significant rainfall contributions coming from hot clouds (top below 5,000 m) in the stratiform shape with shallow convective (that is, clouds that do not form ice in the upper part). The IPCC models and those from the main weather and climate forecasting centers (including the European

Center for Medium-Range Weather Forecasting – ECMWF, viewed as the most precise center for global forecasting) underestimate the rainfall from warm clouds. The lack of rainfall from warm clouds led to the organization of observational studies and modeling of convection in the Amazon (GoAmazon and CHUVA, both with significant participation from FAPESP between 2014 and 2020). We learn from LBA, GoAmazon, and ACRIDICON-CHUVA experiments that the structure of clouds that form in the Amazon is highly influenced by biogenic emissions coming from the Amazonian biota. These gases, particularly terpenes and isoprene, form large condensation nuclei, which drive the high efficiency of stratiform clouds and shallow convective clouds (without ice). These effects have still to be incorporated into the climate and weather forecasting models. However, much research still remains to be done so that these effects can be captured more realistically and more robustly reproducing the remote impact of rainfall in the Amazon and the effects of global warming on rainfall patterns. It is also necessary to encourage further research regarding the coupling of clouds and surface processes (heat exchange, humidity, gases, and momentum) and the radiative effects of clouds since rainfall is an extremely complex process that involves all these mechanisms.

Another aspect of climate modeling for the Amazon still requiring investigation regards biases in IPCC models for positioning the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) in the Atlantic. Usually, models tend to place ITCZ further to the south of the observed position, or even a double band of ITCZ, which is unrealistic. This problem seems to stem from an inability of models to adequately reproduce the oceanic circulations in the equatorial region of the Atlantic and demands further study. Another important aspect in modeling for ITCZ is the validation of the models based on numerous studies undertaken (mainly over the last 10-15 years) regarding ITCZ evolution in the Atlantic and rainfall in the Amazon and in Central Brazil. These studies make evident a problem with the models, which must be eliminated to reduce uncertainties for the future climate of the Amazon under the influence of global warming.

Further research of the dipole precipitation phenomenon induced by vegetation cover changes in the Amazon, which appears in multiple numerical simulations for deforestation effects, is also recommended.

ses setores são particularmente sensíveis à previsibilidade meteorológica e climática, desde a escala de curto e médio prazos, até a sazonal, interanual e decenal. Diante do aumento de eventos climáticos extremos e da dependência socioeconômica ao clima, a qualidade da informação da previsibilidade atmosférica e dos oceanos nas menores escalas temporais será cada vez mais importante.

Conforme as ações de adaptação às mudanças climáticas são implementadas por medidas estruturais de alto investimento financeiro, por exemplo, na ampliação da oferta hídrico-energética, o aperfeiçoamento da previsão das condições atmosféricas eleva a qualidade da informação com redução da margem de risco na tomada de decisão. A modelagem ambiental é ferramenta essencial para estudar como os ecossistemas reagem às mudanças climáticas e identificar processos-chave para a preservação dos ecossistemas. Como meta de pesquisa, devemos fomentar investigações que foquem na redução da incerteza da previsibilidade climática em distintas escalas temporais com: (a) o aprimoramento de modelos numéricos de tempo e clima e (b) o uso de técnicas de análise de resultados de modelos e grandes volumes de dados, por exemplo, a partir do uso de inteligência artificial, redes neurais, redes complexas e outras, de modo a reduzir o viés dos modelos baseados em princípios físicos, e levando a uma melhor estimativa das incertezas atribuídas às previsões e projeções climáticas. Outro uso muito importante das técnicas de análise de grandes volumes de dados refere-se ao tema da atribuição de causas. Dessa forma, contribui-se estrategicamente para o aperfeiçoamento na tomada de decisões no Brasil. O clima tropical tem características próprias nem sempre bem representadas em modelos climáticos globais.

A chuva é a grande incerteza dos modelos de previsão de tempo e clima, especificamente no caso das grandes acumulações ligadas a enchentes e alagamentos. Chuva na região tropical é em geral predominantemente produzida por nuvens profundas com alta quantidade de gelo na parte superior.

Entretanto, o experimento LBA (Experimento de Larga Escala na Biosfera-Atmosfera na Amazônia) mostrou que há expressiva contribuição de chuva oriunda de nuvens quentes (topo abaixo de 5.000 m) na forma estratiforme e convectiva rasa (ou seja, nuvens que não formam gelo na parte superior). Os modelos do IPCC e dos principais centros de previsão de tempo e clima (incluindo o *European Center for Medium Range Weather Forecasting* – ECMWF, tido como o centro de maior acerto nas previsões globais) subestimam a precipitação oriunda de nuvens quentes. A falta de chuva oriunda de nuvens quentes levou à organização de estudos observacionais e de modelagem da convecção na Amazônia (experimentos GoAmazon e CHUVA, ambos com forte participação da FAPESP entre 2014 e 2020). O que aprendemos com os experimentos LBA, GoAmazon e CHUVA é que a estrutura das nuvens que se formam na Amazônia é altamente influenciada pelas emissões biogênicas oriundas da biota amazônica. Esses gases, notadamente terpenos e isoprenos, formam núcleos de condensação de grande tamanho que promovem a alta eficiência das nuvens estratiformes e das nuvens convectivas rasas (sem gelo). Esses efeitos ainda não estão devidamente incorporados nos modelos climáticos e de previsão de tempo. Entretanto, muita pesquisa ainda é necessária para que esses efeitos sejam bem capturados de forma mais realista e reproduzam de forma mais robusta o impacto remoto das chuvas na Amazônia e os efeitos do aquecimento global no regime de chuvas. Também é preciso estimular mais estudos sobre o acoplamento das nuvens com os processos de superfície (trocas de calor, umidade, gases e momentum) e os efeitos radiativos das nuvens, pois a chuva é um processo extremamente complexo que envolve todos esses mecanismos.

Outro aspecto da modelagem climática na Amazônia que precisa ser mais bem explorado é a questão do viés dos modelos do IPCC com relação ao posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) no Atlântico. Os modelos em geral

tendem a colocar a ZCIT mais ao sul da posição observada, ou mesmo uma banda dupla da ZCIT, o que não é realista. Esse problema parece ter origem na inabilidade dos modelos em reproduzir adequadamente as circulações oceânicas na região equatorial do Atlântico e precisa ser mais bem estudado. No tema da ZCIT, outro aspecto importante na modelagem é a validação dos modelos com base nos numerosos estudos que foram realizados (principalmente nos últimos 10-15 anos) sobre a evolução da ZCIT no Atlântico e as chuvas na Amazônia e Brasil Central. Nesses estudos fica evidente que existe um problema com os modelos que precisa ser eliminado para que possamos reduzir as incertezas com relação ao clima futuro da Amazônia sob a influência do aquecimento global.

Recomenda-se também que seja mais bem estudado o fenômeno do dipolo da precipitação induzido pelas mudanças da cobertura vegetal na Amazônia, que aparece em muitas simulações numéricas sobre os efeitos do desmatamento. A grande maioria dos modelos concorda que haja redução de precipitação na Amazônia com a redução da cobertura florestal e que o papel do armazenamento de água na floresta é importante para reduzir o impacto da variabilidade natural do clima na Amazônia e regiões vizinhas (incluindo, por exemplo, a região Sudeste do Brasil). Entretanto, muitos estudos indicam que há aumento, na média de longo prazo, em regiões vizinhas, porém com grande incerteza na localização do máximo (pode ser ao sul da Amazônia, sudeste e leste). Essas pesquisas são fundamentais para que seja diminuída a incerteza nas projeções do IPCC com relação aos efeitos remotos nas regiões vizinhas da Amazônia.

As atividades humanas e emissões de poluentes atingem diretamente a qualidade do ar, com seus fortes impactos na saúde da população. Emissões associadas a queimadas e às diversas atividades de transporte e das indústrias alteram a composição físico-química do ar e afetam o balanço de radiação tanto na atmosfera como na superfície terrestre, afetando a vida

em geral e os ecossistemas em particular. A alteração do balanço de radiação pelos aerossóis atmosféricos tem impacto também na formação de chuvas e, portanto, uma visão integrada de previsão ambiental deve ser buscada.

As tarefas nesta área vão na direção de aperfeiçoamento dos modelos numéricos de tempo e clima, por meio do avanço da representação de processos em modelos físicos e estatísticos, nas suas distintas frequências e escalas de manifestação. Em especial, é preciso buscar a melhor previsão dos eventos meteorológicos extremos em diferentes escalas espaciais e temporais e tendências de mudanças para minimizar seus impactos socioeconômicos. Temos também que aprimorar a utilização de grandes conjuntos de informações de dados instrumentais e de registros meteorológicos/geológicos/oceanográficos do sistema terrestre natural (incluindo os registros paleoambientais), desde escalas de tempo a mais longo prazo, bem como de alta frequência no contexto da ciência dos dados e dos métodos de inteligência artificial e aprendizado de máquinas. Isso possibilitará conhecer novos padrões do clima e de episódios históricos do sistema climático, como meio de amparar o aperfeiçoamento de modelos meteorológicos e climáticos.

O Brasil precisa melhorar o monitoramento ambiental e climático contínuo com coleta de dados e estudos dos principais biomas do Brasil, integrando modelagem ambiental e observação direta. A modelagem para cada bioma deve ser desenvolvida levando-se em conta todas as escalas temporais e espaciais. Temos também que disponibilizar resultados dos modelos climáticos aos tomadores de decisão, cientistas de várias áreas e ao público em geral, com a criação de plataformas de fácil acesso aos resultados dos modelos.

A modelagem do Sistema Terrestre envolve a dinâmica entre sistemas naturais e humanos, considerando questões ambientais e sociais das mudanças climáticas globais, incluindo impactos econômicos, sustentabilidade, vulnerabilidade

The overwhelming majority of models agree that rainfall reductions in the Amazon occur with forest cover reductions and that the role of water storage in the forest is important to minimize the impact of natural climate variability on the Amazon and neighboring regions (including southeastern Brazil). However, many studies indicate that there is a medium to a long-term increase in neighboring regions, but with significant uncertainty for the localization of the maximum (possibly in the southern, southeastern, or western Amazon). These studies are key to minimizing uncertainty in IPCC forecasts regarding remote effects on neighboring Amazon regions.

Human activities and pollution emissions directly affect air quality, significantly impacting population health. Emissions associated with fires and diverse human transportation and industrial activities alter the physical-chemical air composition and affect radiation levels both in the atmosphere and on the earth's surface, affecting life in general and ecosystems in particular. Alterations to radiation balance from atmospheric aerosols also impact rain formation. Therefore, an integrated environmental forecasting perspective should be sought.

The tasks in this area involve improving quantitative weather and climate models and applying advances in the representation of processes in physical and statistical models in their specific frequencies and scales of manifestation. It is especially necessary to improve forecasting of extreme meteorological events at different spatial and temporal scales and change tendencies to minimize their socio-economic impacts. It is also important to streamline the use of large instrumental data sets and of meteorological/geological/oceanographic records of the natural terrestrial system (including paleoenvironmental records). This would involve the longest-range scales and the highest frequency in the context of data science and artificial intelligence methods and learning machines. This will allow us to understand new climate patterns and historical episodes of the climate system as a way to assist the improvement of meteorological and climate models.

Brazil needs to improve ongoing environmental and climate monitoring with data collection and studies of the main Brazilian biomes, integrating environmental modeling and direct observation. Modeling for each biome should be developed taking into account all temporal and spatial scales. We also have to make

climate modeling results available for decision-makers, scientists from various areas, and to the general public through the creation of easily accessible platforms containing model results.

Modeling terrestrial systems involves a dynamic between natural and human systems, considering environmental and social issues related to global climate change, including economic impacts, sustainability, vulnerability, and risk. This is done to present diagnoses and formulate future scenarios for socioenvironmental interactions and responses in the physical environment. This perspective seeks to integrate and organize territorial aspects (agriculture, biodiversity conservation units, urban areas, indigenous areas) with sustainable ecosystem use for biodiversity preservation. The issue of attributing extreme climate events to climate change is also a research area that can help society reduce climate change impacts.

Biodiversity and ecosystem functioning
Ecosystem functioning has been strongly affected by human action and climate change, not only by those at the global level but also at regional and even local levels. However, uncertainties persist regarding the detection and attribution of climate change effects on our tropical ecosystems due to a scarcity of historical data, and long-term monitoring. In tropical forests, increased biomass production accelerated tree life cycles, and altered species abundance and distribution are among the changes related to physiological effects from elevated atmospheric CO₂, which can be measured via soil nutrient availability. In the cerrado and other biomes, our understanding of climate change effects are limited. In the oceans, our understanding is even more limited due to the contingencies of research in this environment. However, we must extend our understanding of the generality of such patterns and of the potential impact on ecosystem processes and their consequences for biota. Predictive distribution models and phylogeographic studies indicated a general reduction in species distribution ranges for any future warming scenario, and extinction risk models show unprecedented species biodiversity losses, even for the mildest warming scenarios (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2019). In the marine environment, water warming has stimulated species and fishing stock migration to higher latitudes.



e riscos, elaborando diagnósticos, assim como construção de cenários futuros das interações socioambientais e respostas no ambiente físico. Esta ação visa integrar e organizar elementos territoriais (agricultura, unidades de conservação da biodiversidade, áreas urbanas, áreas indígenas) com o uso sustentável dos ecossistemas, preservando a biodiversidade. A questão da atribuição dos eventos climáticos extremos à mudança do clima também é uma área de pesquisa que pode auxiliar a sociedade a reduzir os impactos da mudança climática.



Biodiversidade e funcionamento dos ecossistemas

O funcionamento de nossos ecossistemas tem sido fortemente afetado pelas ações humanas e mudanças climáticas, não somente aquelas de nível global, mas também as regionais e até mesmo as locais. Entretanto, ainda há incertezas quanto à detecção e atribuição dos efeitos das mudanças climáticas nos ecossistemas tropicais devido à escassez de dados históricos, monitoramentos de longo prazo e à falta de estudos de caráter experimental ou de manipulação climática nos ecossistemas. Nas florestas tropicais, o aumento da produção de biomassa, aceleração do ciclo de vida das árvores, alterações na distribuição e abundância de espécies estão entre as mudanças relacionadas ao efeito fisiológico da elevação de CO₂ atmosférico, que podem ser mediadas pela disponibilidade de nutrientes nos solos. Nos cerrados,

Considering the synergistic effects of -use changes, deforestation, and high-level fragmentation and degradation of most Brazilian biomes, the vulnerability of our biota and ecosystems increases exponentially, threatening biodiversity and associated ecosystem services. Emission impacts from forest fires on ecosystems and population health are strong, for example, increasing the number of hospitalizations and deaths in the neighboring areas/regions. By exposing ecosystem services to significant risk, these climate change scenarios especially affect agricultural and fishing productivity, energy production, river transport, and, finally, human well-being.

Therefore, to improve our detection and attribution of climate change effects on Brazilian biodiversity and ecosystems, we must better understand related ecosystem services and anticipate responses to future warming scenarios. Thus, we must plan and propose adaptation and mitigation measures and remediation procedures. This must be done at three organizational levels: species, ecosystem, and biome or ecoregion, as well as via different institutional and land ownership arrangements, such as indigenous areas, protected areas, private land, etc. Research goals for the area could focus on interactions between climate, biodiversity, and socio-economic development in the following topics: 1) Long-term monitoring systems for detection of tendencies and alterations in biota and their attribution to climate change; 2) In situ experiments for manipulation of climate variables on Brazilian ecosystems; 3) Modelling of species responses to ecosystems under climate change; 4) Identification of effects of extreme events on biota; 5) Ecological restoration and assisted regeneration; 6) Cascade effects from climate change impacts on ecosystem services provided by Brazilian ecosystems.

Land use changes and agricultural activities
Two areas that drive greenhouse gas emissions in Brazil are changes to land use and farming. Competition between forest preservation and food and biofuel production is discussed in detail in the special IPCC report about climate change and land (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019). With its strong agribusiness and high deforestation rates in the Amazon and Cerrado, Brazil is at the heart of this issue. Climate is a signifi-

cant factor in agricultural productivity. Due to altered rainfall patterns and increased temperatures, we face potential agricultural productivity losses.

The consequences for the management and profit of agricultural properties depend on combinations of cumulative adaptations (precision agriculture, remote sensing, etc.), systemic adaptation (soil and water conservation, genetic diversity, etc.), and transformative adaptations (complex agricultural systems, agroecology, agroforests, etc.). There are beneficial and negative effects in all cases, requiring comparative studies at various scales. One of the challenges is developing more efficient and resilient agriculture drastically reducing further expansion over native vegetation areas, such as the Amazon and Cerrado, while simultaneously reducing emissions. Initiatives for nitrous oxide (N₂O) and methane (CH₄) emission reductions in the farming sector are crucial.

Work in this area should include interdisciplinary research, highlighting aspects of the holistic search for balance concerning agricultural production and environmental conservation. For small producers, climate change impacts can represent a question of survival. In contrast, impacts for large-scale producers mean economic losses that can affect the whole Brazilian socio-economic system. These two situations require different approaches from a research/investigation perspective. The MapBiomass system for Brazilian soil covering is an excellent example of the effort to make science about soil use more transparent and easily accessible for the whole national territory.

We need to maintain high Brazilian agricultural productivity in a changing climate. This includes evaluating resilience, plasticity, and coexistence capacity between native ecosystems and forestry and farming production systems. Research should seek: 1) New technologies (including genetic improvement), and agricultural improvements, taking into account dynamics related to the water-soil-atmosphere continuum, including resilience of critical zones; 2) Development of advanced support systems for decision-making, including weather, climate, and quantitative environmental modeling, advanced information platforms, and integration of biophysical with socio-economic modeling; 3) Advanced implementation methods for new technologies seeking increases in farming productivity with better production and land management practices, and

O funcionamento de nossos ecossistemas tem sido fortemente afetado pelas ações humanas e mudanças climáticas, não somente aquelas de nível global, mas também as regionais e até mesmo as locais.

campos e outros biomas, nosso entendimento dos efeitos das mudanças do clima é ainda mais limitado. Nos oceanos, nosso conhecimento é ainda mais restrito em decorrência das especificidades dos estudos nesse ambiente. Entretanto, precisamos estender nosso conhecimento da generalidade de tais padrões e do potencial impacto nos processos ecossistêmicos e suas consequências para a biota. Modelos de distribuição preditiva e estudos filogeográficos indicam redução geral nas faixas de distribuição de espécies para qualquer cenário futuro de aquecimento, e os modelos de risco de extinção mostram uma perda sem precedentes de biodiversidade de espécies, mesmo para os cenários mais amenos de aquecimento (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2019). No ambiente marinho, o aquecimento da água tem promovido a migração de espécies e estoques pesqueiros para maiores latitudes.

Considerando os efeitos sinérgicos da mudança do uso do solo, do desmatamento e o elevado grau de fragmentação e degradação da maior parte dos biomas brasileiros, a vulnerabilidade da nossa biota e ecossistemas aumenta exponencialmente, ameaçando a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos associados. Os impactos das emissões de queimadas sobre o ecossistema e a saúde da população são

fortes, por exemplo aumentando o número de hospitalizações e óbitos em área/regiões circunvizinhas. Os cenários de mudança climática, ao exporem a um grande risco os serviços ecossistêmicos, afetam especialmente a produção agrícola e a pesca, a produção de energia, o transporte fluvial e, em última instância, o bem-estar humano.

Portanto, para melhorar nossa detecção e atribuição dos efeitos das mudanças climáticas na biodiversidade e ecossistemas brasileiros, temos que entender melhor os serviços ecossistêmicos relacionados e antever respostas a cenários futuros de aquecimento, prevendo e sugerindo medidas de mitigação e adaptação e procedimentos de remediação. Isso deve ser feito em três níveis organizacionais: espécies, ecossistemas e biomas ou ecorregiões, além de diferentes arranjos institucionais e de propriedade, tais como áreas indígenas, áreas protegidas, áreas privadas etc. As metas de pesquisas nesta área poderiam focar nas interações entre clima, biodiversidade e desenvolvimento socioeconômico, nos seguintes tópicos: 1) Sistemas de monitoramento de longo prazo para a detecção de tendências e alterações na biota e sua atribuição às mudanças climáticas; 2) Experimentos *in situ* de manipulação de variáveis climáticas nos ecossistemas do país; 3) Modelagem de respostas de espécies dos ecossistemas às mudanças climáticas;

4) Detecção de efeitos de eventos extremos na biota; 5) Restauração ecológica e regeneração assistida; 6) Efeitos-cascata dos impactos das mudanças climáticas sobre os serviços ecossistêmicos fornecidos pelos ecossistemas do país.

Mudanças de uso do solo e agropecuária

Dois dos setores que lideram as emissões de gases de efeito estufa no Brasil são a mudança de uso do solo e a agropecuária. A competição entre a preservação de florestas e a produção de alimentos e biocombustíveis é discutida em detalhes no relatório especial do IPCC sobre mudança climática e terra (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019). O Brasil, com um forte agronegócio e taxas altas de desmatamento da Amazônia e Cerrado, está no centro desta questão. O clima é um fator significativo na produtividade agrícola. Temos um potencial de perdas de produtividade agrícola devido às alterações no regime de chuvas e aumento de temperatura.

As implicações para o manejo e renda de propriedades agrícolas dependem de combinações de adaptações incrementais (agricultura de precisão, sensoriamento remoto etc.), adaptação sistêmica (conservação de solo e água, diversidade genética etc.) e adaptações transformativas (sistemas agrícolas complexos, agroecologia, agroflorestal etc.). Em todos os casos, efeitos benéficos ou deletérios podem existir, o que requer estudos comparativos em várias escalas. Um dos desafios é desenvolver uma agricultura mais eficiente e resiliente, reduzindo drasticamente novas expansões sobre áreas de vegetação nativa, como a Amazônia e o Cerrado, e ao mesmo tempo, reduzir as emissões. Ações para a redução das emissões do óxido nítrico (N₂O) e metano (CH₄) no setor agropecuário são centrais.

O trabalho nesta área deve contemplar pesquisas interdisciplinares, ressaltando os aspectos da busca integrada do equilíbrio em relação à produção agropecuária e conservação ambiental. Por exemplo, para os pequenos produtores esses impactos das mudanças climáticas podem represen-

tar uma questão de sobrevivência, enquanto para os grandes produtores os impactos reverterão em perdas econômicas que reverberam pelo sistema socioeconômico do país. Essas duas situações demandam olhares diferentes de pesquisa/investigação. O sistema MapBiomass de mapeamento da cobertura do solo de nosso país é um excelente exemplo de esforços em tornar transparente e com fácil acesso à ciência das mudanças do uso do solo para todo o território nacional

De qualquer modo, temos que manter a alta produtividade agrícola brasileira em um clima em mudança. Isso inclui avaliação da resiliência, da plasticidade e da capacidade de coexistência entre ecossistemas nativos e sistemas de produção agropecuários e florestais. As pesquisas devem buscar: 1) Novas tecnologias (incluindo melhoramento genético), aprimorando a agricultura, levando em conta as dinâmicas relacionadas ao contínuo água-solo-atmosfera, incluindo resiliência das zonas críticas; 2) Desenvolvimento de sistemas avançados de apoio à tomada de decisão, incluindo modelagem numérica de tempo, clima e ambiental, plataformas avançadas de informação, e integração da modelagem biofísica aos modelos socioeconômicos; 3) Métodos avançados de implementação de novas tecnologias visando o incremento da produtividade agropecuária com melhores práticas de manejo do solo e da produção, e agricultura de baixo carbono; 4) Analisar a evolução dos padrões de uso do solo, incluindo padrões de desmatamento e verificação do cumprimento das NDC do Acordo de Paris; 5) Pesquisas sobre os impactos na agricultura, incluindo perspectivas em paisagens multifuncionais, voltadas a soluções sustentáveis para o setor de produção agropecuária.

O papel estratégico das cidades frente às mudanças climáticas

Um conjunto expressivo de estudos evidencia o papel estratégico das cidades frente às mudanças climáticas, em particular porque os ambientes urbanos: (i) são responsáveis por altas fontes de emissão de gases

low-carbon agriculture; 4) Analyze the evolution of land use patterns, including deforestation and verify the fulfillment of Paris Agreement NDCs; 5) Research into the impact of agriculture, including approaches for multifunctional landscapes, focused on sustainable solutions for the farming production sector.

The strategic role of cities and climate change

A significant set of studies shows the strategic role of cities in confronting climate change, particularly given that urban environments: (i) are significant sources of greenhouse gas emissions; (ii) can drive paradigm shifts in terms of production and management processes for urban spaces; (iii) constitute an ideal meeting point to experiment with new technologies and solutions focused on diverse issues of the present day; and (iv) are important to developing and carrying out curtailment strategies associated with climate mitigation and adaptation.

Brazil is an urban society, with around 84% of its population living in cities in 2022. Many of these cities are concentrated in areas highly susceptible to the most severe impacts of climate change, such as elevated average sea levels (in coastal cities) and extreme rainfall and temperature events. Recent episodes associated with these events show that alterations in the distribution, intensity, and geographical frequency of risks related to meteorological conditions threaten to exceed the capacity of Brazilian cities to deal with losses and recover from impacts. These impacts tend to exacerbate risks commonly found in Brazilian cities, and deficiencies in the capacity of local governments to deal with infrastructure deficits and provision of basic essential services, aggravating conditions of vulnerability for specific social groups and communities. Therefore, mitigation and adaptation strategies for urban centers should consider impacts such as livability, thermal comfort, health, mobility, and urban planning. Small to medium cities have an important role in mediating between rural populations and large urban centers.

Land use and anthropogenic emissions of gases and particles in urban areas alter the local climate. This issue is even more critical due to the rapid growth of urban areas and disorganized urbanization processes, which usually characterize most Brazilian cities. Even given their particularities, municipalities adopt urban legislation far from the needs of

urban dynamics and creation of urban space and are characterized by the disorganization of specific policies such as those related to environmental preservation and quality and housing. This hampers the integrated development of urban space, making updating and adaptation processes slow and complex. Socio-spatial segregation is another notable characteristic, especially in large urban centers. Flooding episodes and heat island effects, both associated with a reduction in green areas and the historic expansion of urban areas, aggravated in recent decades by climate change, make these events increasingly frequent.

The literature shows that unplanned and unregulated urban sprawl has enormous medium and long-term costs for society. The consequences of neglect of green and blue infrastructure (vegetation covering and water resources) that transform the urban climate tend to intensify recurrent episodes of severe flooding, heatwaves, and poor air quality, leading to serious harm to the quality of life and well-being of individuals. In São Paulo, for example, there is a pattern of urban warming (heat island) of around 3°C as an annual average. Many urban areas have 2 to 3-degree heat islands. These temperature conditions increase the frequency of situations outside the comfort limit aggravated by heat waves and extreme rainfall episodes during summer.

The number of people vulnerable to the effects of heatwaves and extreme rains increased significantly in Brazil and around the world. Air pollution in large cities caused by vehicles and industrial emissions generates impacts on the population's health. The reduction of greenhouse gas emissions would also reduce atmospheric pollutants in urban areas in a synergistic effect with global warming. Significant changes to urban mobility, such as intermodal trips, low-emissions bus corridors, extensive public transport systems, electric vehicles, vehicle sharing etc., are necessary. Priority measures for urban areas could include actions in: 1) Urban mobility solutions for medium and large-sized cities, seeking to reduce GGE emissions and atmospheric pollutants to protect population health; 2) Information to update the Strategic Urban Guidelines, laws for land use and occupation and construction codes focused on sustainable and more resilient cities; 3) Intelligent, integrated systems that bring together urban infrastructure, climate, energy use, transportation, building, food distribution logistics, and goods; 4) Water

de efeito estufa; (ii) podem dar impulso às mudanças de paradigmas em relação aos processos de produção e gestão do espaço urbano; (iii) constituem-se em locus ideal de experimentação de novas tecnologias e soluções direcionadas a diversas questões da atualidade; e (iv) são importantes na elaboração e condução de estratégias de enfrentamento associadas à mitigação e adaptação climática.

O Brasil é uma sociedade urbana com cerca de 84% da população vivendo nas cidades em 2022. Muitas delas concentram áreas altamente suscetíveis aos impactos mais severos das alterações climáticas, como elevação do nível médio do mar (em cidades costeiras) e eventos extremos de precipitação e temperatura. Episódios recentes relacionados a esses eventos evidenciam que as alterações na distribuição, intensidade e frequência geográfica dos riscos relacionados às condições meteorológicas ameaçam exceder a capacidade das cidades brasileiras de absorver perdas e recuperar-se dos impactos. Esses impactos tendem a exacerbar os riscos comumente existentes nas cidades brasileiras, bem como as inadequações na capacidade dos governos locais para tratar dos déficits na infraestrutura e no oferecimento de serviços básicos necessários, agravando as condições de vulnerabilidade de determinados grupos sociais e comunidades. Assim, as estratégias de mitigação e adaptação nos centros urbanos devem considerar aspectos como habitabilidade, conforto térmico, saúde, mobilidade e planejamento urbano. As pequenas e médias cidades têm importante papel nesta questão por intermediarem populações rurais e os grandes centros.

Nas áreas urbanas, o uso do solo e as emissões antropogênicas de gases e partículas alteram o clima local. Esse entendimento é ainda mais crítico considerando o crescimento rápido dos assentamentos urbanos e o próprio processo de urbanização desordenada que caracteriza, em geral, a maioria das cidades brasileiras. Ainda que apresentem suas especificidades, em comum os municípios são marcados por uma legislação urbanística ainda

muito descolada das dinâmicas urbanas e da produção do espaço urbano, e pela desarticulação de políticas setoriais, como as relacionadas à preservação e qualidade ambiental e habitacional, o que dificulta a qualificação integrada do espaço urbano, tornando o processo de atualização e/ou adaptação complexo e lento. A segregação socioespacial também é outra característica marcante, sobretudo nos grandes centros urbanos. Somam-se a esses problemas, os episódios de alagamento e efeitos da ilha de calor, ambos associados à redução das áreas verdes e à expansão histórica das áreas urbanizadas, agravados nas últimas décadas pelas mudanças do clima, tornando esses eventos cada vez mais frequentes.

A literatura tem endossado que a dispersão urbana não planejada e não regulada tem enormes custos para a sociedade a médio e longo prazo. As consequências do descaso com a infraestrutura verde e azul (cobertura vegetal e recursos hídricos), que modulam o clima urbano, tendem a agravar episódios recorrentes de inundações e alagamentos severos, ondas de calor e baixa qualidade do ar, trazendo sérios danos à qualidade de vida e bem-estar dos indivíduos. Em São Paulo, por exemplo, há um padrão de aquecimento urbano (ilha de calor) de cerca de 3 °C na média anual. Muitas áreas urbanas têm ilhas de calor de 2 a 3 graus. Essas condições de temperatura aumentam a ocorrência de condições fora do limiar de conforto, agravadas pelos episódios de onda de calor e chuvas extremas no verão.

O número de pessoas vulneráveis às consequências das ondas de calor e chuvas extremas aumentou significativamente no Brasil e no planeta como um todo. A poluição do ar nas grandes cidades pela frota veicular e emissões industriais trazem impactos à saúde da população. A redução de emissões de gases de efeito estufa também reduziria os níveis de poluentes atmosféricos em áreas urbanas, em efeito sinérgico com o aquecimento global. São necessárias, assim, mudanças profundas na mobilidade urbana, como viagens intermodais, corredores de ônibus de baixa



security in large urban areas with water use and reuse, and quality water supply; 5) Air pollution reductions in large urban centers, particularly gases and particles that act on the climate, such as ozone, methane, volatile organic compounds (VOCs), aerosols, black carbon and others; 6) Urban ecology research to evaluate how global warming affects populations, and health and well-being of people and undertake surveys of the environmental services provided by urban biota; 7) Management processes developed for urban and industrial solid and liquid waste in large cities.

Climate change impacts on human health

Brazil has complex and heterogeneous regions, with diversified temporal and spatial distribution for certain diseases and significant social, cultural, ecological, and climate diversity that directly affects the individual and collective resilience of populations exposed to climate change. Health impacts resulting from global climate alterations depend on the general health of exposed populations, which depend, in turn, on social determinants for health, such as universal health care, socio-environmental governance, public policy, and the state of the 'country's development model. Tropical climates and ecosystem alterations favor pathogen development. Additionally, issues related to food insecurity stemming from climate change are challenges that impact individual health.

Brazil has a wide range of wild animals that host multiple different microorganisms. Many of these are considered etiological agents for diseases, both in animals and humans. As part of the transmission cycle of numerous parasites, human health is intimately connected with the health of wild animals. Environmental alterations, including climate change and biodiversity loss, are decisive factors for the emergence of diseases originating in wild animals. The incidence of infectious diseases usually increases at higher temperatures. Preserved ecosystems in equilibrium have an important role in controlling zoonotic infections and diseases transmitted by vectors.

An estimated 60% of diseases circulate between animals and humans (zoonoses), 72% of which are caused by pathogens of wild origin. It is widely understood that virus diversity (including coronavirus), bacteria, and other pathogenic agents follow the same spatial distribution as

plant and animal diversity, making Brazil the largest repository for these living beings. Global environmental changes directly affect the advance of pathogens and generate impacts on public health and fauna conservation. Among these are the etiological agents for malaria, yellow fever, tuberculosis, toxoplasmosis, leptospirosis, hemorrhagic fevers, rabies, brucellosis, Chagas disease, diseases caused by the oropouche virus, Mayaro, Ebola, and the SARS-CoV-2 coronavirus, among many others. Arboviral diseases, such as dengue, Zika, chikungunya, and yellow fever are the main threats of global climate change to public health. Impacts from fungi are also observed, with mycoses reported for tropical climates being described in temperate climates. The impact of heat is also present in the greater proliferation and growth of insect larvae that are vectors for viral diseases that cause hemorrhagic fevers. Higher temperatures favor fungal development, affecting health and food security during food storage and transportation. These pathogenic agents, among others, provoke significant socio-economic and health impacts and are a growing source of scientific interest.

The burning of biomass due to deforestation and agricultural practices means that air pollution levels in remote areas generate significant effects on public health in the region, with the aggravation of respiratory diseases, mainly for children, the elderly, and those with prior conditions. This increases the risk of hospitalization and mortality from respiratory disease in the region, aggravating a context already characterized by a lack of access to health care services.

The concept "One World, One Health" of the World Health Organization (WHO) includes human, animal, and environmental health policies. Its aim is to expand understanding and actions to confront the challenges of epidemic and epizootic prevention and maintain ecosystem integrity to benefit humans and the biodiversity that supports them. The COVID-19 pandemic caused by the coronavirus SARS-CoV-2 demonstrated the relevance of this approach. The most urgent measures regarding this issue include: 1) Investigating climate change impacts on diseases transmitted by vectors and on the interface between viruses and bacteria restricted to natural ecosystems and their possible dissemination in human societies; 2) Investigating the propagation of diseases such as malaria, dengue, chikungunya, yellow fever and cholera,

O Brasil apresenta uma complexa heterogeneidade nas suas regiões, com diversificada distribuição espacial e temporal de determinadas doenças e grande diversidade social, cultural, ecológica e climática que interferem diretamente na resiliência individual e coletiva das populações expostas às mudanças climáticas.

emissão, sistemas de transporte de massa extensos, veículos elétricos, compartilhamento de veículos etc. As ações prioritárias para as áreas urbanas poderiam contemplar ações em: 1) Soluções para a mobilidade urbana nas grandes e médias cidades, visando reduzir emissões de GEE e de poluentes atmosféricos, protegendo a saúde da população; 2) Conhecimentos para atualização dos Planos Diretores Estratégicos Urbanos, leis de uso e ocupação do solo e códigos de obras focados em cidades sustentáveis e mais resilientes; 3) Sistemas inteligentes integrados que conciliam na infraestrutura das cidades o clima, o uso de energia, transporte, edificações, logística de distribuição de alimentos e bens; 4) Segurança hídrica nos grandes centros urbanos, com uso e reúso da água, além do fornecimento de água com qualidade; 5) Redução da poluição do ar nos grandes centros urbanos, em particular os gases e partículas que têm atuação climática, como ozônio, metano, compostos orgânicos voláteis (COVs), aerossóis, *black carbon* e outros; 6) Pesquisas em ecologia urbana para avaliar como o aquecimento global afeta a população, a saúde e o bem-estar das pessoas e avançar no levantamento dos serviços ambientais fornecidos pela biota urbana; 7) Desenvolver processos de gestão de resíduos sólidos e líquidos urbanos e industriais nas grandes cidades.

Impactos das mudanças climáticas na saúde

O Brasil apresenta uma complexa heterogeneidade nas suas regiões, com diversificada distribuição espacial e temporal de determinadas doenças e grande diversidade social, cultural, ecológica e climática que interferem diretamente na resiliência individual e coletiva das populações expostas às mudanças climáticas. Os impactos na saúde resultantes das alterações climáticas globais dependerão do estado geral de saúde das populações expostas que, por sua vez, depende de condições dos determinantes sociais da saúde, como a cobertura de saúde universal, a governança socioambiental, políticas públicas e os rumos

do modelo de desenvolvimento do país. O clima tropical e as alterações ecossistêmicas favorecem o desenvolvimento de patógenos. Além disso, questões relacionadas à insegurança alimentar devidas às mudanças climáticas são desafios que têm importantes impactos na saúde dos indivíduos.

O Brasil apresenta grande diversidade de animais silvestres que, por sua vez, hospedam múltiplos e diferentes microrganismos, muitos destes considerados agentes etiológicos de doenças, tanto para os animais quanto para o homem. Como parte do ciclo de transmissão de inúmeros parasitos, a saúde humana está intimamente ligada à saúde dos animais silvestres. As alterações ambientais, incluindo as mudanças climáticas e a perda da biodiversidade, são fatores determinantes para a emergência de doenças oriundas de animais silvestres. Em geral, doenças infecciosas crescem em incidência com maiores temperaturas. Os ecossistemas preservados e em equilíbrio têm um papel importante para a dinâmica e controle de doenças zoonóticas e infecções transmitidas por vetores.

Estima-se que mais de 60% das doenças infecciosas circulem entre animais e humanos (zoonoses), e que 72% destas sejam causadas por patógenos com origem na vida silvestre. É já de amplo conhecimento que a diversidade de vírus (incluindo coronavírus), bactérias e outros agentes patógenos segue o mesmo padrão espacial da diversidade de plantas e animais, o que faz do Brasil o maior repositório desses seres vivos. As mudanças ambientais globais têm consequências diretas para o avanço dos patógenos que geram impactos tanto para a saúde pública quanto para a conservação de fauna. Dentre eles, podem ser apontados os agentes etiológicos da malária, febre amarela, tuberculose, toxoplasmose, leptospirose, febres hemorrágicas, raiva, brucelose, doença de Chagas, das doenças causadas pelos vírus oropouche, Mayaro, ebola, e os coronavírus SARS-CoV-2, dentre tantos outros. As doenças arbovirais, como dengue, zika, chikungunya e febre amarela, são as princi-

pais ameaças das mudanças globais à saúde pública. São também observados impactos de fungos, com micoses descritas em climas tropicais, passando a ser descritas em climas temperados. Temos também o impacto do calor na maior proliferação e crescimento de larvas de insetos vetores de doenças virais que causam febres hemorrágicas. A maior temperatura favorece o desenvolvimento de fungos que afetam tanto a saúde quanto a segurança alimentar, no armazenamento e transporte de alimentos. Esses agentes patogênicos, entre outros, provocam impactos importantes na saúde e socioeconomia, e são fonte crescente de interesse científico.

A queima de biomassa decorrente do desmatamento e de práticas agrícolas fazem com que os níveis de poluição do ar em áreas remotas tragam significativos efeitos para a saúde pública da região, com agravamento das doenças respiratórias, principalmente para crianças, idosos e aqueles com enfermidades pregressas, o que aumenta o risco de hospitalização e mortalidade por doenças respiratórias na região, agravando o cenário devido à falta de acesso aos serviços de saúde.

O conceito *One World, One Health* da Organização Mundial da Saúde (OMS) integra políticas de saúde humana, animal e ambiental. Tem o objetivo de ampliar a visão e as ações para o enfrentamento dos desafios da prevenção de epidemias e epizootias e da manutenção da integridade ecossistêmica em benefício humano e da biodiversidade que os suportam. A pandemia de covid-19 causada pelo coronavírus SARS-CoV-2 mostrou a relevância dessa abordagem. As ações prioritárias nessa temática poderiam incluir: 1) Investigações sobre os impactos das mudanças climáticas em doenças transmitidas por vetores e na interface entre vírus e bactérias constringidas nos ecossistemas naturais e sua possível disseminação em nossa sociedade; 2) Investigar a propagação de doenças como malária, dengue, chikungunya, febre amarela e cólera e sua possível associação com mudanças climáticas e aspectos socioeconômicos; 3)

and its possible association with climate change and socio-economic aspects; 3) Investigating health impacts of urban air pollution, particularly carbon monoxide, ozone, nitrogen oxides, ultrafine particles and aerosols; 4) Investigating the impact of emissions from fires associated with deforestation in the Amazon and Cerrado on population health; 5) Investigating the role of extreme climate events such as heatwaves reduction of water availability on mortality and morbidity, prioritizing the most vulnerable groups such as the elderly, children and pregnant women; 6) Investigating water pollution and its impacts on the population and monitoring the implementation of basic sanitation measures to improve water quality in urban areas and areas with intense agriculture and pesticide use.

Socio-economic impacts of climate change
Social and economic dimensions are transversal across all areas affected by climate change. These dimensions represent a range of basic and applied studies of significant relevance to society. While substantial advances have been made in multiscale and integrated research of relations between social and economic processes and climate change, these efforts still represent a relatively small fraction of the research on the issue. The importance of these dimensions for public policy requires a marked evolution in the conceptual and analytic models, in the development of collaborative and participative research, and in their use to assist with public policy. Low-carbon-emission economic models can create employment, and mitigation policies should consider the effect on job creation for less qualified, more vulnerable individuals. It is important to consider the decision-making process for necessary investments, carbon pricing, and choice of options that promote GGE reductions in processes, products, and services. Analyzing processes of territorial strengthening for organized communities in biodiversity production at multiple scales contributes to mitigation. The issue of food security in climate change is also key to social dimensions.

The socio-economic impact of mitigation and adaptation can be significant, especially in developing nations such as Brazil. The role of the private sector in working with academia and legislators to minimize the cost of large transformations is necessary for all areas, such

as energy, construction, transportation, and others. The role of the private sector is essential to developing a low-carbon economy. Priority areas interrelated with the respective issues are proposed to advance research regarding climate changes social and economic dimensions.

Therefore, it is necessary to 1) improve projections of direct and indirect economic impacts resulting from different climate change scenarios in different productive sectors, including social impacts of specific future trajectories and mitigation and adaptation strategies; 2) have a greater understanding of the economic contribution of nature and ecosystem service conservation aiming to minimize climate change impacts for society; 3) create innovation opportunities in the economy for biodiversity, studying potential bioeconomy strategies; 4) develop circular economic models for different economic sectors; 5) understand impacts from predatory and sustainable land use to draft development guidelines to strengthen mitigation policies; 6) create opportunities and synergies to align mitigation and adaptation measures to combat poverty and inequality; 7) work with the concept of “climate justice”, developing strategies that minimize the impacts on less advantaged populations.

Example of a critical ecosystem in rapid transformation: the Amazon
The Amazon is a strategic region for the planet and Brazil (The Amazon we Want, 2021). It is the world's largest tropical forest, with an approximate area of 5.5 million km², 60% of which is Brazilian territory. Its river basin is the largest river system in the world, distributed between Brazil, Bolivia, Colombia, Ecuador, French Guiana, Guyana, Peru, Suriname, and Venezuela. It houses immense biodiversity, with the greater part located in Brazil, representing the largest biome in the country. It plays a fundamental role in providing environmental products and services in the carbon cycle for climate regulation. It is the largest carbon reservoir on any continent, with around 120 billion tons of carbon in the ecosystem, which is equivalent to 10 years of fossil fuel burning. It provides essential ecosystem services for Brazilian society and economy. It has a vast traditional and first people's population, possessing resources of inestimable value such as knowledge, language, and culture of the first peoples and traditional communities. Despite its importance, the ecosystem is being rapidly destroyed by deforestation and climate

Investigar os impactos na saúde da poluição do ar urbana, em particular monóxido de carbono, ozônio, óxidos de nitrogênio e partículas ultrafinas de aerossóis; 4) Investigar o impacto de emissões de queimadas associadas ao desmatamento na Amazônia e Cerrado na saúde da população; 5) Investigar o papel de eventos climáticos extremos como ondas de calor e redução de disponibilidade hídrica na mortalidade e morbidade, com prioridade para grupos mais vulneráveis como idosos, crianças e gestantes; 6) Investigar a poluição hídrica e seus impactos na população e monitorar a implementação de ações de saneamento básico na melhora da qualidade da água em áreas urbanas e em áreas com agricultura intensiva e uso de agrotóxicos.

Impactos socioeconômicos das mudanças climáticas

As dimensões sociais e econômicas são transversais em todas as áreas impactadas pelas mudanças climáticas. Estas dimensões representam um universo de pesquisas básicas e aplicadas de grande relevância para a sociedade. Enquanto avanços significativos têm sido feitos na análise integrada e multiescalar das relações entre processos sociais e econômicos e mudanças climáticas, estes esforços ainda representam uma fração relativamente pequena das pesquisas dedicadas ao tema. A importância destas dimensões para políticas públicas demanda um salto significativo no avanço de modelos conceituais e analíticos, no desenvolvimento de pesquisas colaborativas e participativas e nas suas aplicações como subsídios em políticas públicas. Modelos econômicos de baixa emissão de carbono podem ser geradores de emprego, e as políticas de mitigação não podem deixar de considerar o efeito da geração de empregos para pessoas menos qualificadas e mais vulneráveis. Importante considerar no processo de tomada de decisão os investimentos necessários, a precificação do carbono e a escolha das opções que promovam a redução das emissões de GEE

nos processos, produtos e serviços. Analisar processos de fortalecimento territorial de comunidades organizadas na produção da biodiversidade em diversas escalas contribui para a mitigação. A questão da segurança alimentar em um clima em mudança também é chave nas dimensões sociais.

O impacto socioeconômico da mitigação e adaptação pode ser muito grande, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil. É fundamental o papel do setor privado trabalhando com a academia e legisladores para minimizar o custo das grandes transformações necessárias em todas as áreas, como energia, edificações, transporte e outras. A atuação do setor privado é essencial no desenvolvimento de uma economia de baixo carbono. Áreas prioritárias inter-relacionadas com respectivos temas ilustrativos são propostas para avançar as pesquisas sobre as dimensões sociais e econômicas das mudanças climáticas.

Neste sentido, é importante: 1) aprimorar projeções sobre impacto econômico direto e indireto de diferentes cenários de mudanças climáticas em diferentes setores produtivos, incluindo impactos sociais de distintas trajetórias futuras e estratégias de mitigação e adaptação; 2) ter uma maior compreensão da contribuição econômica da conservação da natureza e dos serviços ecossistêmicos visando minimizar impactos de mudanças climáticas para a sociedade; 3) criar oportunidades de inovações na economia da biodiversidade, estudando potenciais estratégias de bioeconomia; 4) desenvolver modelos de economia circular para diferentes setores econômicos; 5) conhecer os impactos territoriais predatórios e os impactos territoriais sustentáveis para orientar políticas de desenvolvimento no sentido de fortalecer as políticas de mitigação; 6) Criar oportunidades e sinergias para alinhar medidas de mitigação e adaptação ao combate à pobreza e desigualdade; 7) trabalhar com o conceito de “justiça climática”, desenvolvendo estratégias que minimizem os impactos na população menos favorecida.

Exemplo de um ecossistema crítico em rápida transformação: Amazônia

A Amazônia é uma região estratégica para o planeta e para o Brasil (The Amazon we Want, 2021). Contempla a maior floresta tropical do mundo, com uma área aproximada de 5,5 milhões de km², dos quais 60% estão em território brasileiro; sua bacia hidrográfica é o maior sistema fluvial global, distribuído entre Brasil, Bolívia, Colômbia, Equador, Guiana Francesa, Guiana, Peru, Suriname e Venezuela; hospeda uma gigantesca biodiversidade, sendo a maior parte localizada no Brasil, representando o maior bioma do país. Desenha papel fundamental na provisão de produtos e serviços ambientais no ciclo do carbono e na regulação do clima. É o maior reservatório de carbono em regiões continentais, contendo cerca de 120 bilhões de toneladas de carbono, ou o equivalente a 10 anos de toda a queima de combustíveis fósseis. Presta serviços ecossistêmicos essenciais para a sociedade e a economia brasileira. Tem uma vasta população tradicional e indígena, detentora de ativos de valores inestimáveis como conhecimento, língua e cultura dos povos indígenas e comunidades tradicionais.

Apesar de sua importância, o ecossistema está sendo destruído rapidamente, através do desmatamento e do impacto das mudanças climáticas no ecossistema. O INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), por meio do sistema de monitoramento do desmatamento amazônico, observou em 2021 a conversão de mais de 13.000 km² de florestas. As emissões de dióxido de carbono e metano associadas ao desmatamento e queimadas evidenciam o processo destrutivo recente sobre a Amazônia. Como resultado desse processo, o ciclo hidrológico está sendo alterado em vastas áreas. Por outro lado, algumas regiões da Amazônia tiveram aumento expressivo de temperatura (maior que 2,2 °C), redução da precipitação (cerca de 20%) e aumento dos fenômenos climáticos extremos como grandes secas e inundações. Como resultado, temos observado uma degradação pronunciada na floresta,

com perda de carbono e biomassa. A Figura 3 mostra as interações entre as emissões do desmatamento e seus impactos no aquecimento global, bem como o aquecimento global que impacta no estoque de carbono da Amazônia.

Pesquisas de grande escala, como o experimento LBA, permitiram avanços importantes no conhecimento dos ecossistemas e das relações natureza-sociedade-economia na Amazônia. Essas pesquisas medem o impacto das ações humanas, a exemplo do avanço do desmatamento, bem como mostram o enorme potencial da biodiversidade da região e sua contribuição essencial para o clima regional e global. É consenso hoje que a preservação da floresta é fundamental para a sustentabilidade do planeta. O bioma amazônico é rico em diversidade cultural, linguística, biológica e geológica, e investimentos em ciência, tecnologia e inovação, em pesquisas básicas e aplicadas são estratégicos para a sua compreensão e sua sustentabilidade.

No entanto, apesar de ser caracterizada como a região que hospeda a maior biodiversidade natural do país, o seu desenvolvimento socioeconômico em torno de atividades relacionadas à floresta ainda não alcançou escala de projeção em todo o seu potencial. Há um gigantesco desafio no âmbito da regularização fundiária, e faltam planos concretos de crescimento econômico inclusivo e sustentável.

É necessária a formulação de uma estratégia de transição econômica sustentável através da sociobiodiversidade. Esta formulação envolve questões territoriais, ligadas a questões fundiárias no ambiente rural e urbano. É importante também desenvolver cadeias de valor e sociobiodiversidade que mudem as atuais práticas e modelos econômicos atuais para um novo conjunto de iniciativas econômicas baseadas na floresta em pé. Esta nova economia deve ser estruturada na proteção e uso sustentável dos recursos naturais, rompendo com o atual modelo de desenvolvimento predatório. E a questão da disponibilização de soluções energéticas para o desenvolvimen-

change impacts. The National Institute for Space Research (INPE), via the Amazon deforestation monitoring system, observed the conversion of more than 13,000km² in 2021. The carbon dioxide and methane emissions associated with deforestation and burning exemplify the recent destructive processes in the Amazon. As a result, the hydrological cycle is being altered over vast areas. On the other hand, some Amazonian regions showed significant temperature increases (higher than 2.2 °C), reduced rainfall (around 20% less), and more frequent extreme climate events with intense droughts and flooding. As a result, notable forest degradation has been observed, with carbon and biomass loss. Figure 3 shows the interactions between emissions from deforestation and its impacts on global warming and global warming, which in turn impacts the Amazon carbon stock.

Large-scale research, such as the LBA experiment, provides important advances in understanding ecosystems and nature-economy-society relationships in the Amazon. These studies measure the impact of human action, such as the expansion of deforestation, and show the enormous potential of the region's biodiversity and its essential contribution to regional and global climate. It is a consensus today that preserving the Amazon rainforest is fundamental for planetary sustainability. The Amazon biome is rich in cultural, linguistic, biological, and geological diversity, and investments in science, technology, and innovation, in both basic and applied research, are strategies for its understanding and sustainability.

However, despite being described as the region with the greatest natural biodiversity in Brazil, its socio-economic development in relation to activities related to the forest has still not achieved a scale of projection proportional to its potential. There is an enormous challenge regarding land regulation and a lack of concrete plans for inclusive and sustainable economic growth.

Drafting a sustainable economic transition strategy through sociobiodiversity is necessary. This formulation involves territorial questions related to land issues in rural and urban environments. It is also important to develop value chains and sociobiodiversity that change current practices and economic models for new economic initiatives based on forest conservation. This new economy should be structured for the protection and sustainable use of natural resources, halting the current predatory development

model. The availability of energy solutions for regional development is also critical, given the low solar energy incidence on the surface, because of the high cloud cover, and the low wind speed on the surface of the Amazon rainforest. Diesel-powered electric generators are still widely used in the Amazon.

MITIGATION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS

According to the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021), global greenhouse gas emissions should fall by 7.6% per year from 2021 to 2030 to avoid the possibility of climate collapse, stabilizing global warming at 1.5°C. As a signatory nation to the Paris Agreement, Brazil has a commitment to end its net greenhouse gas emissions by 2050 and reduce emissions by 37% by 2025 and 43% by 2030, in comparison with 2005 levels. Our commitments in the Brazilian NDC and those signed in the COP-6 in Glasgow include:

- Increase the use of alternative energy sources;
- Increase the proportion of sustainable bioenergy in the Brazilian energy mix to 18% by 2030;
- Use clean technologies in industry;
- Improve transportation infrastructure;
- Restore and reforest up to 12 million hectares;
- Reduce carbon emissions by 50% by 2030;
- Reduce methane emissions by 30% by 2030;
- Be carbon neutral by 2050;
- Stop deforestation of the Amazon by 2028.

We are far from even minimally achieving our international commitments for a number of reasons. Figure 4 shows the most up-to-date evaluation of Brazilian greenhouse gas emissions according to the SEEG system (Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa, 2022). We can observe that in 2019 deforestation accounted for 44% of our emissions, while other sectors accounted for: farming (38%); energy (19%); industrial processes (5%); and waste (4%). Notably, land-use changes and farming, which are connected, are responsible for 72% of our emissions.

The greater part of Brazilian climate commitments still requires effective public policy based on science. This will demand significant effort from society, in the construction of a more sustainable economy, with solutions that will be developed in Brazil.

In the IPCC emissions scenarios that limit the temperature increase to 1.5 or

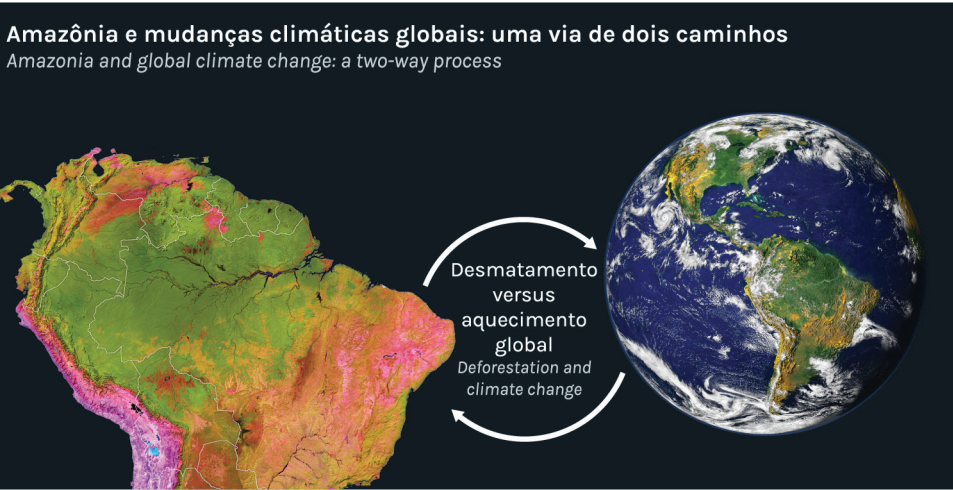


Figura 3. Interações entre as emissões do desmatamento e seus impactos no aquecimento global, e como o aquecimento global impacta no ecossistema amazônico. Fonte das fotos: NASA (National Aeronautics and Space Administration, 1997, 2018). Figura criada pelos autores. *Figure 3.* Interactions between deforestation emissions and their impacts on global warming, and how global warming affects the Amazon ecosystem. Photos source: NASA (National Aeronautics and Space Administration, 1997, 2018). Figure created by the authors.

to regional é também crítica, já que a incidência de energia solar na superfície é baixa, por causa da alta nebulosidade, e a velocidade do vento também é baixa na superfície da floresta Amazônica. Geradores elétricos movidos a diesel são ainda uma constante na Amazônia.

A MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

Segundo o IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021), as emissões globais de gases de efeito estufa devem cair 7,6% ao ano de 2021 a 2030 para afastar a chance de colapso climático, estabilizando o aquecimento global em 1,5 °C. O Brasil, como nação signatária do acordo de Paris, tem o compromisso de zerar suas emissões líquidas de gases de efeito estufa em 2050, além de reduzir as emissões em 37% até 2025, em 43% até 2030, em comparação com emissões de 2005. Nossos compromissos na NDC

brasileira e os assinados na COP-6 em Glasgow incluem:

- Aumentar o uso de fontes alternativas de energia;
- Aumentar a participação de bioenergias sustentáveis na matriz energética brasileira para 18% até 2030;
- Utilizar tecnologias limpas nas indústrias;
- Melhorar a infraestrutura dos transportes;
- Restaurar e reflorestar até 12 milhões de hectares;
- Reduzir em 50% as emissões de carbono até 2030;
- Reduzir as emissões de metano em 30% até 2030;
- Ser neutro em emissões de carbono até 2050;
- Zerar o desmatamento da Amazônia até 2028.

Estamos muito longe de conseguir cumprir minimamente nossos compromissos internacionais, por uma série de razões. A Figura 4 mostra a avaliação mais atual das emissões de gases de efeito estufa brasileiras, de acordo com o sistema SEEG (Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa, 2022). Observamos que, em 2019, o desmatamento responde por 44% de nossas emissões, enquanto os demais setores ficam com: agropecuária 28%; energia 19%; processos industriais 5%; e resíduos 4%. Importante salientar que mudança de uso de solo e agropecuária, que estão ligados, são responsáveis por 72% de nossas emissões.

A maior parte dos compromissos climáticos brasileiros ainda necessita de políticas públicas efetivas e baseadas em Ciência. Vão exigir grandes esforços da sociedade, na construção de uma economia mais sustentável, com soluções que terão de ser desenvolvidas em nosso país.

Nos cenários de emissões do IPCC que limitam o aumento de temperatura em 1,5 ou 2 °C está prevista a necessidade de remover carbono já emitido para a atmosfera. Um aspecto importante é que a Ciência ainda vai ter que desenvolver métodos eficientes de remoção de CO₂ da atmosfere-

ra, através de processos conhecidos como “Carbon Capture Utilization and Storage – CCUS”. Entre esses processos temos “CO₂ Direct Air Capture”, “BECCS – Bioenergy with Carbon Capture and Storage”, captura e armazenamento de carbono no solo e na vegetação, e outras tecnologias ainda a serem desenvolvidas. O conhecimento científico para transformar a economia que temos hoje em uma economia de baixo carbono também terá que ser desenvolvido em muitos setores industriais e de serviços. Esforços de pesquisas nessas áreas serão estratégicos para atingir cenários de emissões que possam limitar o aumento da temperatura global em 2 °C.

O DESAFIO DA ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Adaptação é compreendida como processos de ajustamento para antecipar impactos adversos das mudanças climáticas que resultam na redução da vulnerabilidade. Se nos sistemas ecológicos adaptação inclui ajustes autônomos em processos ecológicos e evolucionários, nos sistemas humanos adaptação pode ser antecipatória ou reativa, incremental ou transformativa (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021, 2022). No contexto das mudanças climáticas, esforços de adaptação podem gerar vários benefícios adicionais, como melhoria da produtividade agrícola, inovação, saúde e bem-estar, segurança alimentar, conservação da biodiversidade, bem como redução de riscos e danos. Por outro lado, ações de “má-adaptação” (*maladaptation*) podem ampliar vulnerabilidades e riscos, exacerbando iniquidades já existentes.

Capacidade adaptativa é o potencial de um sistema (como uma cidade, por exemplo) de mudar para um estado mais desejável frente aos impactos e riscos das mudanças climáticas. Estudos focados em adaptação climática mostram que os processos adaptativos, sobretudo nos sistemas urbanos, são estreitamente dependentes da disposição dos atores (particularmente dos atores institucionais nos níveis subnacionais e locais) de empreenderem medidas

2 °C, there is still a need to remove already emitted carbon from the atmosphere. An important aspect is that science still has to develop efficient CO₂ removal methods through processes known as “Carbon Capture Utilization and Storage-CCUS”. Among these processes are “CO₂ Direct Air Capture”, “BECCS – Bioenergy with Carbon Capture and Storage” carbon capture and storage in soil and vegetation, and other technologies still to be developed. The scientific knowledge currently available to transform our economy today into a low-carbon economy will also have to be further developed in many industrial and service sectors. Strategic research in these areas will aim to achieve emissions scenarios that limit the global average temperature increase to 2 °C.

THE CHALLENGE OF CLIMATE CHANGE ADAPTATION

Adaptation is understood as an adjustment process to anticipate adverse impacts from climate change, thereby generating reduced vulnerability. If adaptation in ecological systems involves autonomous adjustments in ecological and evolutionary processes, adaptation in human systems can be gradual or transformative, anticipatory or reactive (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021, 2022). In the climate change context, adaptation efforts can generate additional benefits, such as improved agricultural productivity, innovation, health and well-being, food security, biodiversity conservation, and risk and harm minimization. On the other hand, maladaptation can intensify risk and vulnerability, exacerbating existing inequality.

Adaptive capacity is a system's potential (such as a city, for example) to change to a more desirable state in the face of impacts and risks from climate change. Studies focused on climate adaptation show that adaptive processes, especially in urban systems, are closely dependent on the willingness of actors (especially institutional ones at local and sub-national levels) to carry out adaptive measures, on the capacity to implement and appropriately provide resources, and to organize conditions that can facilitate or impede consolidation of initiatives. Climate adaptation initiatives tend to be more easily implemented and organized when we seek synergies with policies, resources, and other existing measures, including actions to encourage sustainability, quality of life, and improved infrastructure.

Brazil is particularly vulnerable to climate change due to its tropical location, its socio-

economic structure strongly dependent on rainfall patterns, its urban deficiencies, and its enormous social inequalities. Brazil's climate adaptation plan (CAP), launched in 2016, seeks to guide management and reduction initiatives for risks stemming from medium and long-range adverse effects of climate change in the social, economic, and environmental fields. However, until the present day, long-term planning focused on climate adaptation has still not gained traction in Brazil. Among the reasons for this delay are the complexity involved in adaptation, economic, institutional, and political limitations, especially in cities, relationships of interdependence between climate change dynamics and urban planning, and political questions. This interdependence has been decisive in delaying and hampering the necessary adjustment processes. Recently, the Ministry for Science, Technology, and Innovation (MCTI) launched the Adapt Brazil platform, which suggests a series of public policies to be implemented (Sistema de Informações e Análises sobre Impactos das Mudanças Climáticas, 2022).

Although improved levels of income, education, health, and other socio-economic indicators – the so-called generic capacities – are important to reduce vulnerability to climate change overall, considering the set of specific risks that climate alterations represent for cities (flooding, droughts, sea-level rise, heat islands), there is also an urgent need to look at specific capacities necessary to overcome and recover from these stressors, including mapping risk areas, early warning systems and planning to deal with natural disasters. Understanding how these capacities combine and affect different cities in terms of size, socio-economic indicators, and infrastructure is fundamental to supporting them in preparing for and responding to and adapting to climate change.

The lack of useful data and information that can assist in the management, planning, and governance is frequently identified as one of the main barriers to advance adaptation to climate change, translated into paralysis and inaction at the decision-making level. Therefore, promoting greater involvement by information users (institutional actors, for example) in the production and circulation of knowledge is as important as the capacity to produce techno-scientific information that is easily converted into strategies, policies, and adaptation actions. One of the main challenges for scientific knowledge production is to

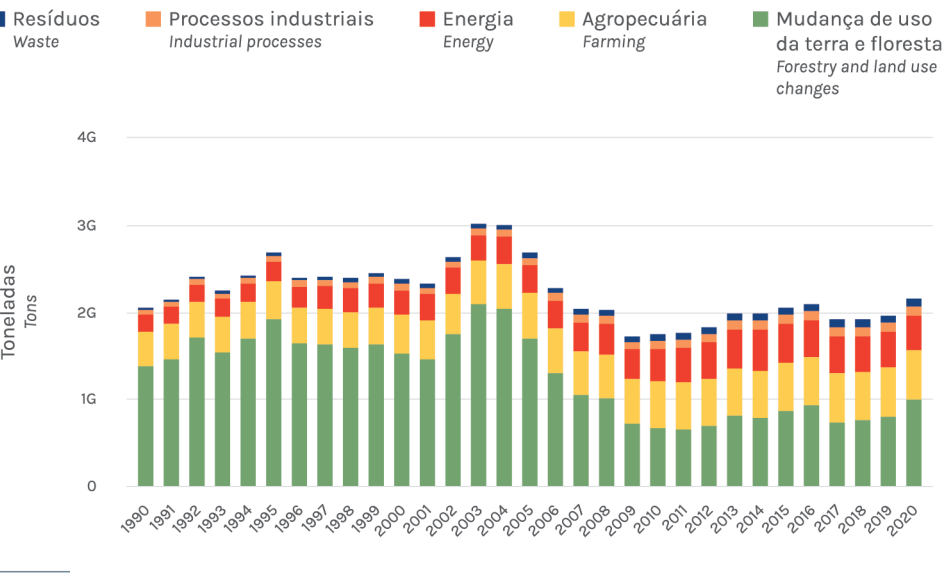


Figura 4. Emissões de gases de efeito estufa do Brasil, de 1990 a 2020 por setor econômico. Nota-se o crescente impacto das emissões da agropecuária e do desmatamento na Amazônia. As emissões energéticas dobraram de 1990 a 2020. Fonte: SEEG (Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa, 2022). Figure 4. Greenhouse gas emissions in Brazil from 1990 to 2020 by economic sector. The growing impact of emissions from farming and deforestation in the Amazon is notable. Energy emissions doubled from 1990 to 2020. Source: SEEG (Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa, 2022).

adaptativas, da capacidade de implementar e disponibilizar recursos de maneira apropriada, e do arranjo de condições que podem facilitar ou dificultar a consolidação de iniciativas. As ações de adaptação climática tendem a ser mais facilmente implementadas e organizadas quando buscam sinergias com políticas, recursos e outras medidas já existentes, incluindo ações visando à sustentabilidade, qualidade de vida e melhoria de infraestrutura.

O Brasil é um país particularmente vulnerável às mudanças climáticas por sua localização tropical, por sua estrutura socioeconômica fortemente dependente do regime de chuvas e pelas inadequações urbanísticas e enormes iniquidades sociais. O Brasil tem um plano de adaptação climática (PNA), lançado em 2016, que visa orientar iniciativas para gestão e redução dos riscos provenientes dos efeitos adversos das mudanças

climáticas no médio e no longo prazo, nas dimensões social, econômica e ambiental. Todavia, até o momento, um planejamento de longo prazo voltado à adaptação climática ainda não ganhou projeção no país como um todo. Entre as razões para esse atraso estão a própria complexidade envolvida na adaptação, as limitações econômicas, institucionais e políticas e, em particular nas cidades, as relações de interdependência entre mudanças do clima, dinâmicas do planejamento urbano e questões políticas. Essa interdependência tem sido determinante para atrasar e dificultar os processos de ajustamento necessários. Recentemente, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) lançou a plataforma Adapta Brasil, que sugere uma série de políticas públicas a serem implementadas (Sistema de Informações e Análises sobre Impactos das Mudanças Climáticas, 2022).

Embora melhorias nos níveis de renda, educação, saúde e outros indicadores socioeconômicos – as chamadas capacidades genéricas – sejam importantes para reduzir a vulnerabilidade às mudanças do clima em geral, considerando o conjunto de riscos específicos que as alterações climáticas representam em particular para as cidades (por exemplo, inundações, secas, aumento do nível do mar, ilhas de calor), há também necessidade urgente de considerar as capacidades específicas necessárias para superar e se recuperar desses estressores, incluindo, por exemplo, mapeamento de áreas de risco, sistemas de alerta precoce e planejamento de enfrentamento a desastres naturais. Compreender como essas capacidades se combinam e afetam diferentes cidades – em termos de tamanho, indicadores socioeconômicos e infraestrutura – é fundamental para apoiá-las na preparação, resposta e adaptação às mudanças climáticas.

A falta de dados e informações úteis e utilizáveis que possam ser mobilizados para subsidiar gestão, planejamento e governança é frequentemente identificada como uma das principais barreiras para o avanço da adaptação às mudanças climáticas, traduzindo-se em paralisia e inação por parte dos tomadores de decisão. Nesse contex-

to, tão importante quanto a capacidade de produzir informação técnico-científica que seja facilmente convertida em estratégias, políticas e ações de adaptação é promover maior envolvimento dos usuários da informação (os atores institucionais, por exemplo) na produção e circulação do conhecimento. Assim, um dos desafios centrais na produção de conhecimento científico reside justamente no desenvolvimento e aplicação de indicadores e análises espaciais para avaliar o desempenho de jurisdições e organizações (como municípios, por exemplo) diante de fenômenos complexos que não são diretamente mensuráveis, como adaptação climática e capacidade adaptativa. A produção e disponibilização desses dados, que incluam métricas robustas e possam ser atualizados periodicamente e que estejam conectados às especificidades da realidade brasileira, considerando um conjunto de variáveis que refletem na capacidade adaptativa, podem impulsionar ações e políticas públicas de adaptação.

Considerando que os governos, embora cumpram papel importante no planejamento efetivo de adaptação, não são capazes sozinhos de resolver a crise climática, dada sua complexidade e multidimensionalidade, e entendendo que adaptação requer parcerias, alianças estratégicas e outras formas de colaboração entre diferentes setores e organizações, as pesquisas também devem buscar compreender melhor as respostas sociais e individuais às mudanças climáticas. Análises sobre como os indivíduos conceituam e respondem às mudanças climáticas e seus possíveis impactos em suas vidas e bem-estar e sobre múltiplos fatores que moldam reações, respostas e antecipações individuais e coletivas às mudanças climáticas e suas incertezas são importantes. Assim como estudos sobre iniciativas de adaptação *bottom-up* envolvendo diferentes setores, como grupos privados, movimentos sociais, coletivos, incluindo análises sobre o potencial de respostas sinérgicas que poderiam moldar caminhos alternativos para o avanço da resiliência climática nas cidades brasileiras.

develop and apply indicators and spatial analyses to evaluate the effectiveness of jurisdictions and organizations (such as municipalities) in dealing with not directly measurable phenomena, such as climate adaptation and adaptive capacity. The production and provision of this data, including periodically updated and reliable metrics, are connected to Brazil's particular context, considering a set of variables that reflect the adaptive capacity, and can drive adaptation actions and public policy.

Although they fulfill an important role in effective adaptation planning, governments alone are unable to resolve the climate crisis given its complexity and multidimensionality. Adaptation requires partnerships, strategic alliances, and other forms of collaboration between different sectors and organizations. As such, research efforts should also seek better to understand social and individual responses to climate change. Analyses regarding how individuals understand and respond to climate change and its possible impacts on their lives and well-being are important, as are analyses of the numerous factors that shape individual and collective reactions, responses, and expectations regarding climate change and its uncertainties. Bottom-up adaptation initiatives involving different sectors, private groups, social movements, and collectives are also relevant. This includes an analysis of the potential for synergistic responses that could shape alternative pathways to advance climate resilience in Brazilian cities.

Finally, an important question has arisen for studies into adaptation: which social, political, economic, and cultural variables and configurations facilitate and/or hamper the potential for change towards a more desirable state in dealing with potential impacts and risks from climate change? Research regarding this subject should include empirical analyses about interventions that align urban planning and climate adaptation; examples of “no regrets” and win-win measures with actions adopted to respond to risks associated with climate alterations and drive the transition towards sustainability; and variables that influence governance, development, and inequality and how they show themselves in adaptive capacities of cities. Research regarding the best adaptation strategies is crucial since they usually involve local and regional solutions.

There are also the so-called “climate geoengineering” proposals, which involve deliberately modifying the climate, potentially seeking to reduce global warming impacts.

These techniques involve: 1) injecting aerosol particles into the stratosphere; 2) putting soluble iron into the oceans to increase CO₂ capture; 3) increasing cloud cover; 4) altering the surface albedo through the use of vegetation; 5) placing mirrors in space to reflect solar radiation, among other potential strategies. Studies undertaken through in situ means and modeling show that none of these strategies work adequately, and many of them have undesirable collateral effects. The main finding of these studies is that the best way to deal with global climate change is via emissions reductions.

THE CONSTRUCTION OF A SUSTAINABLE CLIMATE FUTURE

There is a pressing need to construct new development pathways. This could, however, represent a significant process of social adjustment, including that of the global economic system. Numerous international reports highlight the need to formulate a new development model. Figure 5 illustrates the various existing potential pathways, starting from the present-day throughout this century, which could lead to constructing a new, more resilient, sustainable, and socially just society. We do not have much time left to guarantee our future since climate change is rapidly intensifying.

A central question for contemporary and future science is how to process and analyze all this information from different sources and scales, that is, how to deal with the large volume of data from “Big Data” processes. The progressive digitalization of modern society allows us to acquire a large amount of data and information. Methodologies and tools are necessary for the process, analysis, sharing and modeling of such information. This effort provides greater access to information and knowledge to optimize natural, human, and economic resources and evaluate the impacts of the strategies adopted and their possible correction. The effectiveness of emission mitigation solutions and better climate change adaptation strategies is also dependent on data processing and model development for forecasting and simulation. Ever faster responses in the face of extreme meteorological events depend on this information. FAPESP argues that all scientific data collected by funded projects should be in the public domain, rapidly available on easily accessible platforms for any user, following a policy of open data availability. The publication

Finalmente, uma importante questão tem sido colocada para os estudos sobre adaptação: que variáveis e configurações sociais, políticas, econômicas e culturais facilitam e/ou dificultam o potencial de mudar para um estado mais desejável frente aos impactos e riscos às mudanças climáticas? Pesquisas nesta temática devem incluir análises empíricas sobre: intervenções que alinham planejamento urbano e adaptação climática; exemplos de medidas *no regrets* e *win-win* com ações adotadas para responder aos riscos associados às alterações climáticas e impulsionar a transição para sustentabilidade; e variáveis que influenciam governança, desenvolvimento e desigualdade e como estas refletem na capacidade adaptativa das cidades. Pesquisas sobre as melhores estratégias de adaptação são essenciais, pois estas, em geral, envolvem soluções locais ou regionais.

Existem propostas na linha chamada de “geoengenharia climática”, que envolvem modificar propositadamente o clima, potencialmente visando reduzir o impacto do aquecimento global. Estas técnicas envolvem: 1) injetar partículas de aerossóis na estratosfera; 2) jogar ferro solúvel nos oceanos para aumentar a captura de CO₂; 3) aumentar a cobertura de nuvens; 4) alterar o albedo da vegetação; 5) colocar espelhos no espaço refletindo a radiação solar, entre outras potenciais estratégias. Estudos feitos por medidas *in situ* e modelagem mostram que nenhuma dessas estratégias funciona adequadamente, e muitas têm efeitos colaterais indesejáveis. A conclusão principal desses estudos é que a melhor maneira de lidar com mudanças climáticas globais é através da redução de emissões.

A CONSTRUÇÃO DE UM FUTURO CLIMÁTICO SUSTENTÁVEL

Hoje é evidente a necessidade da construção de uma nova rota de desenvolvimento, que poderá ser um grande processo de redirecionamento de nossa sociedade, incluindo o sistema econômico global. Inúmeros relatórios internacionais apontam para a necessidade da construção de um no-

Hoje é evidente a necessidade da construção de uma nova rota de desenvolvimento, que poderá ser um grande processo de redirecionamento de nossa sociedade, incluindo o sistema econômico global.

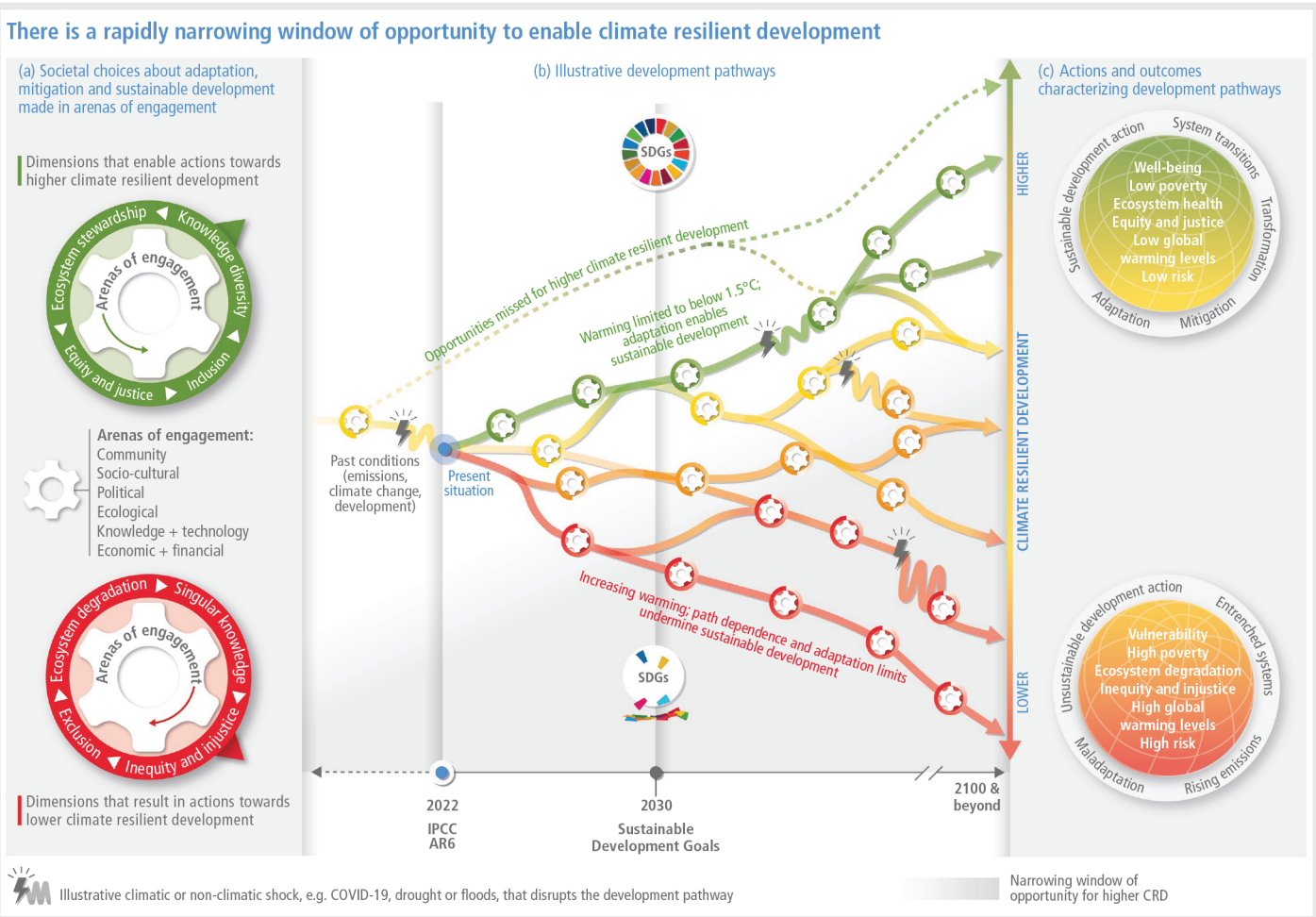


Figura 5. Diagrama evidencia a urgência das ações de mitigação e adaptação visando à construção de uma sociedade resiliente, e as várias trajetórias ao longo deste caminho. Fonte: IPCC WG2 SPM (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022) (Reprodução de figura e legenda autorizada). Crédito: "Figure SPM.5" (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, p. 32).

Figure 5. The diagram shows the urgency of adaptation and mitigation actions, seeking to construct a resilient society, with various trajectories along the way. Source: IPCC WG2 SPM (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022) (Authorized reproduction of figure and legend). Credit: "Figure SPM.5" (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, p. 32).

Figure SPM.5 | Climate resilient development (CRD) is the process of implementing greenhouse gas mitigation and adaptation measures to support sustainable development. This figure builds on Figure SPM.9 in AR5 WGII (depicting climate resilient pathways) by describing how CRD pathways are the result of cumulative societal choices and actions within multiple arenas.

Panel (a) Societal choices towards higher CRD (green cog) or lower CRD (red cog) result from interacting decisions and actions by diverse government, private sector and civil society actors, in the context of climate risks, adaptation limits and development gaps. These actors engage with adaptation, mitigation and development actions in political, economic and financial, ecological, socio-cultural, knowledge and technology, and community arenas from local to international levels. Opportunities for climate resilient development are not equitably distributed around the world.

Panel (b) Cumulatively, societal choices, which are made continuously, shift global development pathways towards higher (green) or lower (red) climate resilient development. Past conditions (past emissions, climate change and development) have already eliminated some development pathways towards higher CRD (dashed green line).

Panel (c) Higher CRD is characterised by outcomes that advance sustainable development for all. Climate resilient development is progressively harder to achieve with global warming levels beyond 1.5°C. Inadequate progress towards the Sustainable Development Goals (SDGs) by 2030 reduces climate resilient development prospects. There is a narrowing window of opportunity to shift pathways towards more climate resilient development futures as reflected by the adaptation limits and increasing climate risks, considering the remaining carbon budgets. (Figure SPM.2, Figure SPM.3) (Figure TS.14b, 2.6, 3.6, 7.2, 7.3, 7.4, 8.3, 8.4, 8.5, 16.4, 16.5, 17.3, 17.4, 17.5, 18.1, 18.2, 18.3, 18.4, Box 18.1, Figure 18.1, Figure 18.2, Figure 18.3, CCB COVID, CCB GENDER, CCB HEALTH, CCB INDIG, CCB SLR, WGI AR6 Table SPM.1, WGI AR6 Table SPM.2, SRI.5 Figure SPM.1)

vo modelo de desenvolvimento. A Figura 5 ilustra os vários caminhos potenciais que temos, a partir de hoje ao longo deste século, que podem levar à construção de uma

nova sociedade mais resiliente, sustentável e justa socialmente. Não temos muito tempo, pois as mudanças climáticas estão se agravando rapidamente.

of results in open access journals for their ample dissemination is also important. Outlining strategies to adequately inform society about Climate Change is

also important. Scientific outreach and citizen science are effective recognized strategies that should be encouraged, implemented, and improved. Outreach and public information campaigns about global warming, as well as illustrating, showing data patterns and tendencies, explaining their effects, discussing incorrect information in the media, and releasing research results are goals of this agenda. This strategy also implies support for citizen science platforms and education tools for science and knowledge.

These proposals are aligned with global and national sustainability measures. Their lines of action include the 2030 Agenda objectives for sustainable development. They are underpinned by global studies, such as numerous IPCC reports and measures proposed by IPBES, focusing on transformative actions for our society. Proposals outlined in the new urban agenda (UN-Habitat) and discussions from forums such as COP (The United Nations Climate Change Conference), and WHO One World, One Health program, among others, were also considered. Our auxiliary task is to help the country develop strategies based on science so that Brazil meets its international commitments (NDC) based on the Paris Agreement. Assistance in formulating public policy based on science at all levels (municipal, state, national and global) is a fundamental goal. These activities will demand great scientific effort from academia in partnership with various social sectors. Adaptation to climate change in diverse regions of Brazil will also require science to consider the needs of our society.

Brazil has notable strategic advantages to confront these challenges. However, it also has significant vulnerabilities due to its vast coastal area, vulnerability to sea-level rise, and its tropical location strongly affected by increasing global temperatures. The predictions for diminished rainfall over the Brazilian territory, particularly in the northeast, central Brazil, and the Amazon, should be reasons for concern. Our economy based on farming production may not have the same productivity in the scenario of reduced rainfall over the coming decades, and our cities are not prepared for the increase of extreme climate events.

These are only some of the important issues that Brazil will face, and solutions based on well-grounded science will have a greater chance of guaranteeing a sustainable trajectory for our country.

Uma questão essencial da ciência contemporânea e futura é como processar e analisar toda essa informação de diferentes fontes e escalas, ou seja, como lidar com o grande volume de dados através do processo denominado “Big Data”. A progressiva digitalização da sociedade moderna possibilita a aquisição de grande quantidade de dados e informações. São necessárias metodologias e ferramentas para processamento, análise, compartilhamento e modelagem. Esse esforço possibilita não só maior acesso à informação e conhecimento para otimizar recursos naturais, humanos e econômicos como também para avaliar os impactos das estratégias adotadas e sua eventual correção. A efetividade de soluções de mitigação de emissões e melhores estratégias de adaptação às mudanças climáticas é também dependente do processamento de dados e desenvolvimento de modelos de predição e/ou simulação. Respostas cada vez mais rápidas frente a eventos meteorológicos extremos dependem dessas informações. Vale salientar que a FAPESP apoia que todos os dados científicos coletados pelos projetos financiados sejam de domínio público, disponibilizados rapidamente em plataformas de fácil acesso a qualquer usuário, dentro de uma política aberta de disponibilização de dados. É importante também a publicação de resultados em revistas de acesso aberto para ampla disseminação dos resultados.

Importante também destacar o delineamento de estratégias para informar adequadamente a sociedade sobre as Mudanças Climáticas. A divulgação científica e a ciência cidadã são estratégias efetivas e já reconhecidas, que devem ser incentivadas, implementadas e aperfeiçoadas. Divulgar e informar o público sobre o aquecimento global, definir, ilustrar, mostrar as tendências e padrões de dados, explicar os seus efeitos, discutir as informações imprecisas na mídia e divulgar os resultados das pesquisas são prerrogativas desta agenda. Nesta estratégia está o apoio às plataformas para a ciência cidadã, ferramentas de educação para a ciência e o conhecimento.

Estas propostas estão alinhadas com as ações globais e nacionais de sustentabilidade. Suas linhas de ação contemplam os objetivos da Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável e são balizadas por estudos globais, como os diversos relatórios do IPCC, as ações propostas pelo IPBES, focando nas ações transformativas de nossa sociedade. Foram considerados também preceitos descritos na nova agenda urbana (UN Habitat) e discussões de fóruns como as COP – Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima e o programa One World, One Health da OMS, entre outros. Temos como tarefa auxiliar o país a desenvolver estratégias baseadas em ciência para que o Brasil cumpra suas obrigações internacionais (as NDC) associadas ao Acordo de Paris. O auxílio na formulação de políticas públicas baseadas em ciência em todos os níveis (municipal, estadual, nacional e global) é tarefa fundamental. Estas atividades exigirão grande esforço científico da academia em parceria com os vários setores da sociedade. A adaptação às mudanças climáticas nas diversas regiões do nosso país também irá requerer ciência olhando para as necessidades da sociedade.

Nosso país tem notáveis vantagens estratégicas para enfrentar estes desafios. Mas também tem vulnerabilidades importantes, pela sua vasta área costeira, vulnerável ao aumento do nível do mar, e pela sua localização tropical, fortemente afetada pelo aumento global de temperatura. As previsões de redução nas precipitações sobre o território brasileiro, particularmente no Nordeste, Brasil central e Amazônia, devem ser motivo de preocupação. Nossa economia baseada na produção agropecuária pode não ter a mesma produtividade em um cenário de redução de chuvas ao longo das próximas décadas. E nossas cidades não estão preparadas para o aumento dos eventos climáticos extremos.

Estas são somente algumas das importantes questões que o Brasil terá que enfrentar, e soluções baseadas em ciência sólida certamente têm mais chances de garantir uma trajetória sustentável a nosso país.

REFERÊNCIAS/REFERENCES

- Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP. (2022). *Programa FAPESP de Mudanças Climáticas*. <https://fapesp.br/pfpmcg/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. (2019). *IPCC SRCCL 2019 - Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/srccl/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. (2021). IPCC AR6 WG1 2021. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, Working Group II, Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., & Okem A. (Eds.). (2022). Summary for Policymakers. In H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, & B. Rama (Eds.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. In Press.
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services – IPBES. (2019). Global assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES. <https://ipbes.net/>.
- National Aeronautics and Space Administration – NASA. (1997). Earth - The Blue Marble. Earth Observatory, NASA. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/565/earth-the-blue-marble>.
- National Aeronautics and Space Administration – NASA. (2018). Mapping the Amazon. Earth Observatory, NASA. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/145649/mapping-the-amazon>.
- Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa – SEEG. (2022). <https://seeg.eco.br/>.
- Sistema de Informações e Análises sobre Impactos das Mudanças Climáticas – AdaptaBrasil MCTI. (2022). <https://adaptaBrasil.mcti.gov.br/>.
- The Amazon We Want. (2021). *Science Panel for the Amazon. Executive Summary of the Amazon Assessment Report 2021* (48 p.). The Amazon we Want. United Nations Sustainable Development Solutions Network. <https://www.theamazonwewant.org/>.
- World Economic Forum – WEF. (2022). *The Global Risks Report 2022* (17th ed., 117 p.). WEF. <https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2022>.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. (2022). *Acordo de Paris*. <https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>.
- Brazilian Biodiversity Platform and Ecosystem Services – BPBES. (2022). <https://www.bpbes.net.br/en/>.
- Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP. (2022). *Plano Científico do Programa FAPESP de Mudanças Climáticas*. <https://fapesp.br/14884/plano-cientifico-mudancas-climaticas-2020-2030>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. (2014). *IPCC AR5 Synthesis Report 2014*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5 °C. Special Report*. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- International Energy Agency – IEA. (2017). *Energy Technology Perspectives 2017: Catalyzing Energy Technology Transformations*. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>.
- Objetivos do Desenvolvimento Sustentável – ODS. (2022). <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>.
- Observatório do Clima. (2022). <https://www.oc.eco.br/en/>.
- Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas – PBMC. (2022). <http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/index.php/pt/>.
- The Lancet. (2022). *Global Burden of Diseases*. <https://www.thelancet.com/gbd>.
- UN Environment. (2019). *UNEP Global Environment Outlook 6 Report*. <https://www.unenvironment.org/resources/global-environment-outlook-6>.