

Impactos das mudanças climáticas na sociobioeconomia da Amazônia

DIEGO OLIVEIRA BRANDÃO^I

JULIA ARIEIRA^{II}

CARLOS A. NOBRE^{III}

Introdução

A AMAZÔNIA tem presenciado mudanças climáticas significativas nas últimas cinco décadas. Atividades humanas que causam aquecimento global, secas extremas, incêndios florestais e desmatamento têm resultado em perda de biodiversidade e afetado o papel da floresta na regulação do clima global (Nobre et al., 2016). Conseqüentemente, os serviços ecossistêmicos, como a provisão de alimentos, fibras, óleos e madeira, têm sido reduzidos. Assim, as mudanças climáticas colocam em risco a subsistência de Povos Indígenas e Comunidades Locais (PICL), porque esses são altamente dependentes da floresta saudável e do manejo das espécies nativas para suprir suas necessidades básicas (Shanley; Luz, 2003; Brandão et al., 2022; Baniwa et al., 2023).

A sociobioeconomia de saudáveis florestas em pé e rios fluindo na Amazônia é um conceito emergente que reflete uma abordagem econômica interdisciplinar para apoiar o desenvolvimento sustentável (Brondizio et al., 2016; Garrett et al., 2023). Isso abrange a geração e o fornecimento de bens e produtos ambientais para consumo, comercialização, regulação climática, suporte de ciclos biogeoquímicos e recreação, incluindo (i) restauração e conservação de floresta, (ii) manejo de sistema agroflorestal, (iii) processamento industrial de produtos nativos (iv) manejo de pesca e (v) ecoturismo (Abramovay et al., 2021). Desse modo, as interconexões entre a conservação da Amazônia, os PICL e o desenvolvimento econômico são consideradas, buscando soluções baseadas na natureza para combater a degradação ambiental e as desigualdades sociais na região.

Embora a sociobioeconomia seja vista como uma alternativa promissora para reverter décadas de destruição da floresta e injustiças contra os PICL, sua implementação enfrenta desafios significativos. A proximidade de um ponto de não retorno (*tipping point* em inglês) é uma preocupação crescente pela provável redução irreversível na diversidade biológica e no estoque de carbono florestal (Hirota et al., 2021), desencadeada por mudanças hidrológicas e energéticas resultantes do ritmo das mudanças climáticas globais e de usos da terra na re-

gião. Estimativas indicam que até 2050, entre 10% e 47% da floresta amazônica podem atingir esse ponto crítico (Flores et al., 2024), aumentando para uma proporção ainda maior, entre 40% e 70%, até 2100 (Nobre et al., 2016; Staal et al., 2020).

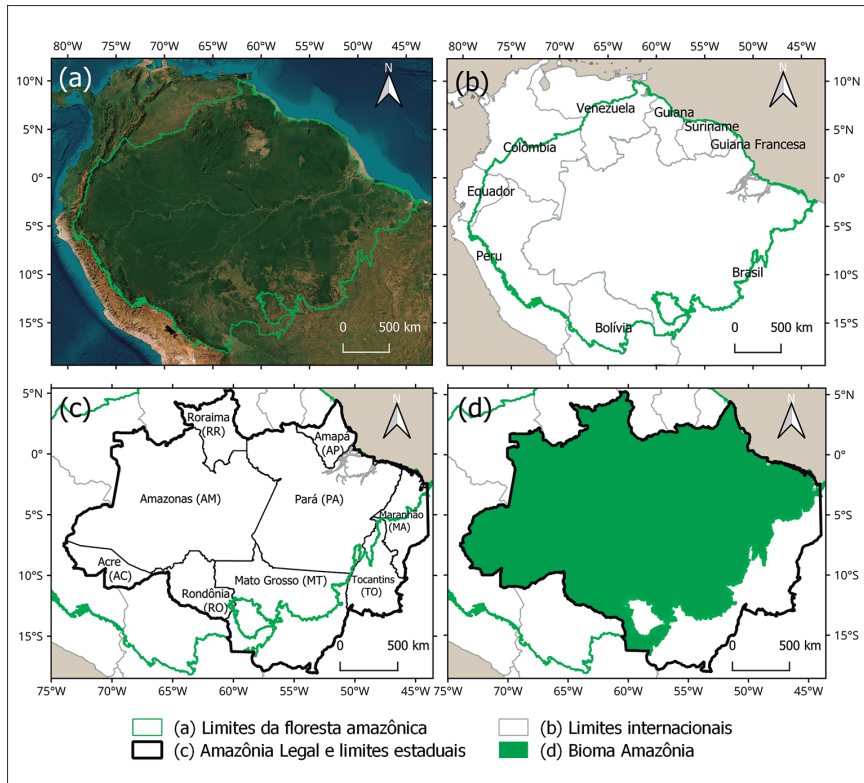
O objetivo deste estudo foi discutir, com base em dados secundários e na literatura técnico-científica, os potenciais impactos das mudanças climáticas nos serviços ecossistêmicos, especificamente na provisão de Produtos Florestais Não Madeireiros (PFNM), os quais se constituem em elementos nutricionais e econômicos da sociobioeconomia da Amazônia. Assim, este estudo apresenta as tendências de mudanças climáticas associadas com: i) o aumento de temperatura; ii) as secas; iii) e os incêndios florestais, bem como discute suas relações com os PFNM. Finalmente, são apresentadas algumas soluções baseadas na natureza para fortalecer a sociobioeconomia da Amazônia.

Metodologia

Área de estudo

A floresta amazônica está situada na América do Sul (Figura 1a), ocupando uma área de 6,3 milhões de km², que abrange Brasil, Bolívia, Colômbia, Equador, Guiana Francesa, Guiana, Peru, Suriname e Venezuela (Figura 1b). A área de estudo está localizada no Brasil, delimitada oficialmente como Amazônia Legal (Figura 1c), correspondendo a 58,9% do território brasileiro ou 5,0 milhões de km² (IBGE, 2020). Essa área foi delimitada com a finalidade de promover o desenvolvimento sustentável da região de floresta amazônica formada por nove estados brasileiros (Figura 1c). A Amazônia Legal inclui toda a Amazônia brasileira (bioma Amazônia), com 4,2 milhões de km² de extensão territorial (IBGE, 2004), representando 49,3% do território do Brasil (Figura 1d).

De acordo com a classificação climática de Köppen, as classes climáticas encontradas na Amazônia Legal são: equatorial chuvoso ('Af'), monção tropical ('Am'), e tropical úmido e seco ('Aw'). A convecção tropical, um aspecto proeminente do clima amazônico, é regulada por vários fenômenos, incluindo a circulação atmosférica em grande escala, como a circulação de Hadley, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a circulação de Walker, a oscilação intraestacional de 40-60 dias e as ondas atmosféricas. Além disso, a precipitação é afetada pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que se estende da Amazônia aos trópicos e alcança o sul do Oceano Atlântico brasileiro, bem como pela Alta Boliviana e uma crista próxima à costa nordeste do Brasil. Essas classes climáticas e padrões de circulação atmosférica desempenham um papel crucial no clima da Amazônia (Borma; Nobre, 2013; Almeida et al., 2016).

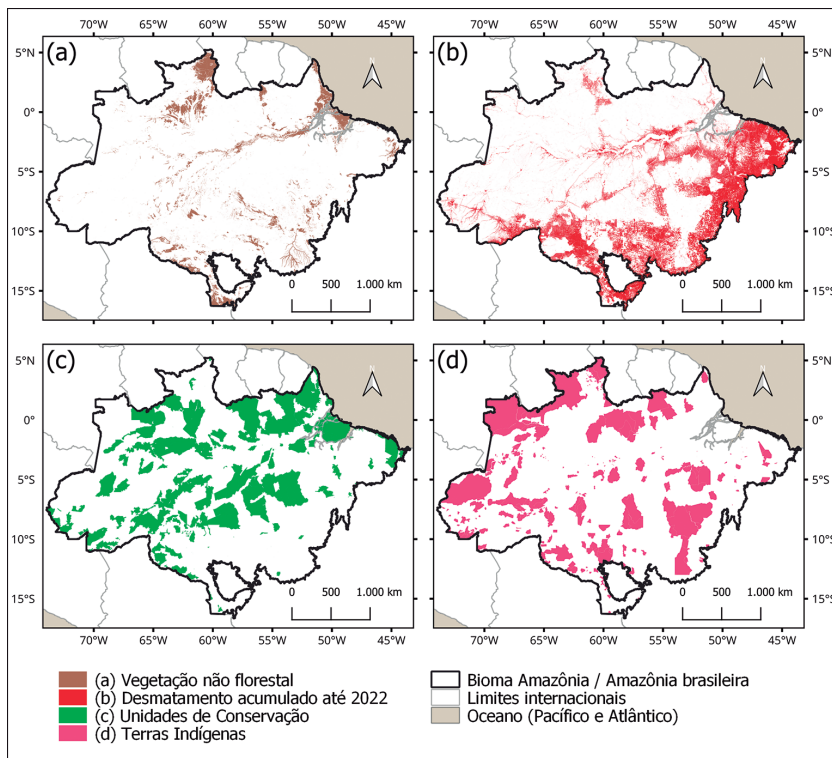


Fontes: Inpe (2023); QGIS (2023). Produzida pelos autores.

Figura 1– Representação da área de estudo. (a) Limites da floresta amazônica. (b) Países da região amazônica. (c) Amazônia Legal e limites estaduais. (d) Bioma Amazônia.

A vegetação predominante na área de estudo é a floresta tropical ombrófila. Porém, algumas regiões na área de estudo são cobertas por vegetação não florestal (Figura 2a). Essas regiões estão concentradas no norte de Roraima, leste do Amapá, nordeste da ilha de Marajó (PA) e na área de transição entre a vegetação da Amazônia e do Cerrado. As regiões mais afetadas pelo desmatamento se encontram no sul e sudeste da Amazônia (Figura 2b), nos estados do Pará, Mato Grosso, Rondônia, Maranhão e Tocantins (Inpe, 2023). As áreas protegidas estão distribuídas por toda a região, compreendendo as Unidades de Conservação federais (Figura 2c) e as Terras Indígenas (Figura 2d).

A população humana na bacia amazônica está estimada em 47 milhões de habitantes, havendo indicações de 2.2 milhões de Indígenas (Science Panel for the Amazon, 2021). No Brasil, o Censo Demográfico de 2022 fez a contagem de 28 milhões de pessoas na Amazônia Legal, sendo 800 mil Indígenas (IBGE, 2022). Estima-se que há 6 milhões de pessoas diretamente dependentes da floresta para subsistência na Amazônia brasileira (Lopes et al., 2019).



Fonte: Inpe (2023). Produzida pelos autores.

Figura 2 – Representação de características espaciais da área de estudo. (a) Vegetação não florestal, (b) desmatamento acumulado até 2022, (c) Unidades de Conservação federais e (d) Terras Indígenas.

Critérios para seleção de dados

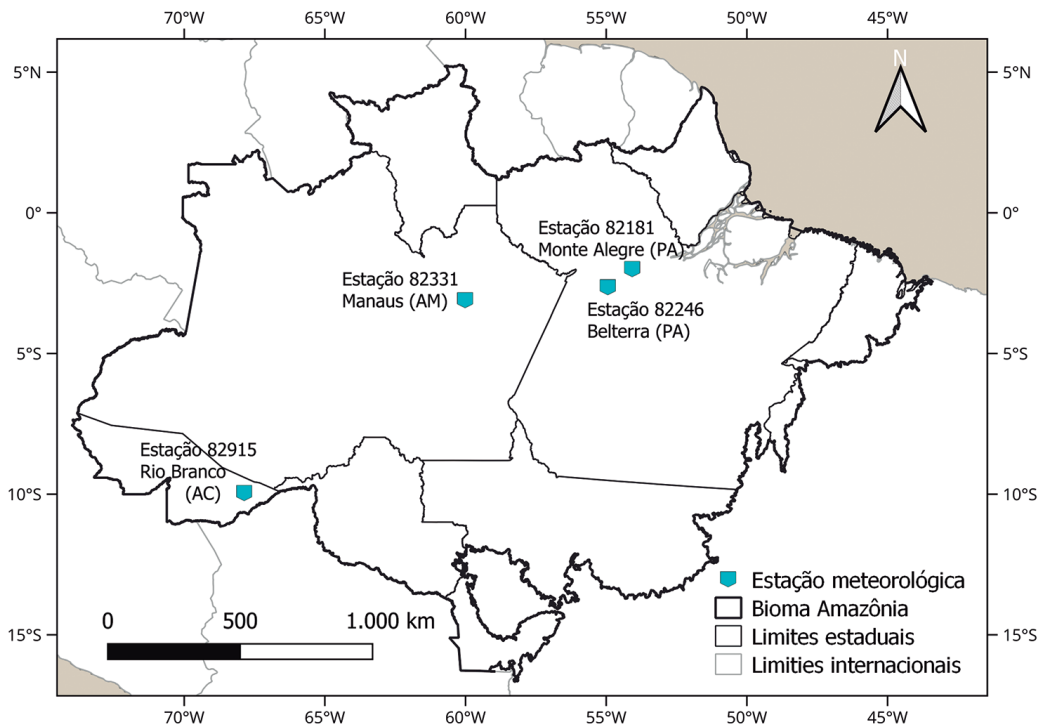
Dados de uma variedade de fontes oficiais e científicas foram selecionados para descrever e representar graficamente os fenômenos em estudo. Isso incluiu dados do Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET, 2024), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe, 2023), da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2023), da National Oceanic Atmospheric Administration dos Estados Unidos (NOAA, 2023) e dos relatórios do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021), da World Meteorological Organization (WMO, 2023; 2024) e do Science Panel for the Amazon (SPA, 2021). Na medida do possível, os dados selecionados foram representativos das últimas cinco décadas, de 1974 a 2023. Finalmente, artigos e livros científicos também foram explorados para fornecer informações complementares acerca da temperatura, secas e incêndios florestais na área de estudo. Mais detalhes sobre a seleção de dados serão expostos a seguir.

Dados de temperatura do ar

Dados de temperatura média compensada do INMET (2024) foram obtidos para descrever as tendências na temperatura do ar na Amazônia brasileira.

De acordo com Diniz et al. (2018), a temperatura média compensada é calculada utilizando a soma de quatro variáveis de temperatura observadas em diferentes momentos ao longo do dia: a temperatura mínima do ar, a temperatura máxima do ar, a temperatura do ar às 12h00 e duas vezes a temperatura do ar à 00h00, dividida por cinco.

O INMET possui estações meteorológicas em vários municípios da Amazônia brasileira. Quatro estações meteorológicas foram selecionadas para o presente estudo (Figura 3; Tabela 1). A seleção dessas foi justificada pela disponibilidade de dados históricos mais completos, considerando que há dados faltantes nos bancos de dados disponibilizados pelo INMET (2024). A seleção buscou as estações operantes pelo maior período possível entre 1 de janeiro de 1974 e 31 de dezembro de 2023. Finalmente, buscou-se estações meteorológicas distribuídas pela Amazônia brasileira, resultando em distâncias em linha reta entre as estações variando de 119 km a 1.760 km (Figura 3).



Fonte: INMET (2024). Produzida pelos autores.

Figura 3 – Estações meteorológicas localizadas nos municípios de Belterra (PA), Manaus (AM), Monte Alegre (PA) e Rio Branco (AC).

Os dados mensais de temperatura média compensada foram transformados em dados anuais usando a média aritmética. Esse cálculo foi feito somando os valores mensais e dividindo o resultado por 12 (o número de meses em um ano). Porém, alguns dados não estavam disponíveis no banco de dados do INMET (2024). Para preencher esses dados ausentes foi utilizada a média aritmética men-

sal de 1981 a 2010, com exceção dos anos com mais do que cinco meses de dados ausentes, os quais foram excluídos da análise. Os dados ausentes representaram 4%, 3%, 2% e 3%, respectivamente, dos registros nas estações meteorológicas localizadas em Belterra, Manaus, Monte Alegre e Rio Branco. Os dados anuais de temperatura foram então descritos e representados graficamente, destacando a tendência temporal e os anos mais quentes usando uma análise de quartil.

Tabela 1 – Informações de localização das estações meteorológicas cujos dados foram analisados para representar a tendência de temperatura do ar na Amazônia brasileira de 1974 a 2023

Município (Estado)	Código da Estação	Latitude	Longitude	Altitude
Belterra (PA)	82246	-2,642	-54,943	164,3
Manaus (AM)	82331	-3,103	-60,016	61,25
Monte Alegre (PA)	82181	-2	-54,076	100,5
Rio Branco (AC)	82915	-9,959	-67,868	160,7

Fonte: INMET (2024).

Dados de secas

Dados referentes às secas foram obtidos em duas fontes distintas. A primeira fonte de dados foi a ANA (2023), acessando o banco de dados da estação fluviométrica localizada no Porto de Manaus, em Manaus, Amazonas. Essa estação fluviométrica faz medidas diárias da cota do Rio Negro. Neste estudo, as últimas cinco décadas da cota mínima (vazante) do Rio Negro foram analisadas e representadas graficamente, considerando a cota mínima do rio em metros no eixo das ordenadas e os anos de 1974 a 2023 no eixo das abscissas.

A segunda fontes de dados foi a NOAA (2023), utilizando a plataforma *Climate Reanalyzer*. Foi obtida uma representação gráfica do aquecimento anômalo dos oceanos Atlântico e Pacífico no dia 22 de outubro de 2023. Essa representação foi estimada com base em uma combinação de observações de satélite, navio e boias, cuja anomalia de temperatura do mar foi representada com base na climatologia de 1971 a 2000 (NOAA, 2023). Essa fonte de dados foi utilizada para descrever as relações do aquecimento da superfície desses oceanos com o registro histórico de secas na Amazônia.

Dados de incêndios florestais

Dados acerca de incêndios florestais na Amazônia brasileira foram obtidos do Programa Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2024). Os dados de monitoramento dos focos ativos no bioma Amazônia foram acessados para realizar duas análises e suas representações gráficas. Primeiramente, foi feita uma análise do número de focos de incêndios ativos no período entre

1999 e 2023. Esse período consiste em dados disponíveis e completos para os respectivos anos. Posteriormente, foi feita uma análise gráfica para representar o número de focos de incêndios ativos entre janeiro e dezembro, mostrando seus valores máximos, médios e mínimos no período analisado.

Processamento dos dados

Os dados foram processados utilizando três sistemas computacionais. As figuras representativas da área de estudo foram produzidas utilizando o Sistema de Informação Geográfica Quantum (QGIS, 2024), versão 3.28. Para isso, os arquivos no formato Shapefiles foram obtidos da plataforma brasileira Terrabrasilis do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe, 2023). O Microsoft Excel foi utilizado para organizar os dados e fornecer análises descritivas sobre eles. O aplicativo R foi utilizado para extrair estatísticas descritivas dos dados analisados e produzir figuras sobre a temperatura, a seca e os incêndios (R Core Team, 2023).

Resultados e discussão

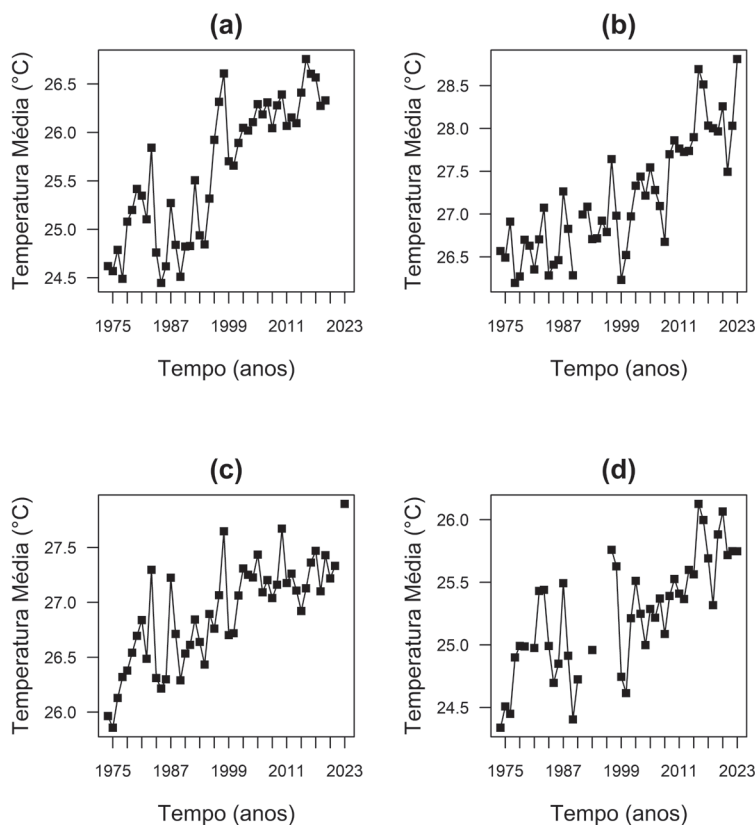
Aumento de temperatura do ar

Os dados de temperatura média compensada indicam claramente a tendência de aumento entre 1974 e 2023 (Figura 4). Os anos mais quentes ocorreram entre 2010 e 2023, especialmente em 2015 e 2023. O ano de 2015 foi o mais quente em Belterra (PA) e Rio Branco (AC), com 27,8°C e 26,1°C – respectivamente. O ano de 2023 foi o ano mais quente em Manaus (AM) e Monte Alegre (PA), com 28,8°C e 27,9°C – respectivamente.

Apesar de as estações meteorológicas estarem distantes entre si, observa-se uma tendência comum de aumento de temperatura nas diferentes regiões. De fato, a tendência de aumento de temperatura identificada neste estudo é corroborada por pesquisas anteriores. Analisando dados entre 1973 e 2013, Almeida et al. (2016) encontraram um aumento de 0,3°C a 0,4°C por década. Essa tendência foi significativa em 95% das estações meteorológicas na região (ibidem). A tendência de aumento de temperatura na Amazônia também segue a tendência global de aquecimento reportada pelo IPCC (2021) e WMO (2024).

A temperatura média global da superfície da Terra entre 2014 e 2023 aumentou 1,20°C ± 0,12°C em relação à média de 1850-1900 (WMO, 2024). A variação de temperatura sobre as áreas terrestres foi de 1,34°C a 1,83°C, com uma média de 1,59°C, enquanto sobre os oceanos variou de 0,68°C a 1,01°C, com uma média de 0,88°C (IPCC, 2021). O ano 2023 foi o mais quente já registrado em 174 anos, com a temperatura média global da superfície próxima de 1,45°C acima da média de 1850-1900, a linha de base pré-industrial (WMO, 2024).

Para cada ano entre 2023 e 2027, prevê-se que a temperatura média global da superfície da Terra varie entre 1,1°C e 1,8°C em comparação com o período de 1850 a 1900 (WMO, 2023). Em cenários de altas emissões de gases de efeito estufa, o aumento de temperatura na Amazônia pode chegar a 6°C até o final do século (Salazar et al., 2007).

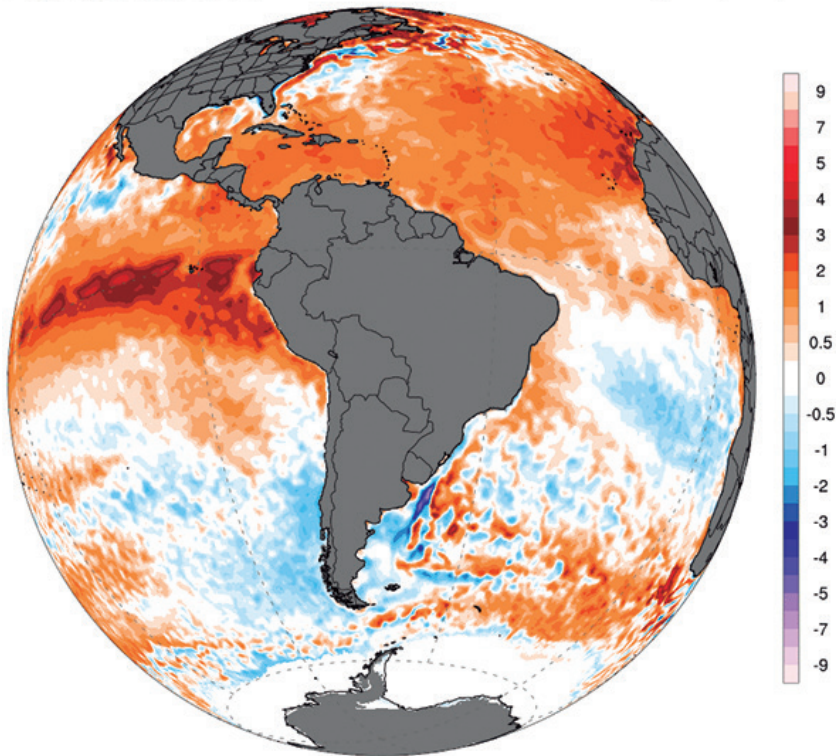


Fonte: INMET (2024). Produzida pelos autores.

Figura 4 – Representação das medidas de temperatura média compensada (°C) nas estações meteorológicas localizadas na Amazônia brasileira entre 1974 e 2023: Belterra (a), Manaus (b), Monte Alegre (c) e Rio Branco (d).

Ocorrência de secas

Nas últimas décadas, a Amazônia enfrentou secas extremas nos anos de 1982/1983, 1991/1992, 1993, 1994/1995, 1997/1998, 2005, 2010, 2015/2016 e 2023/2024 (Sampaio, 1999; Alves et al., 2013; Jiménez-Muñoz et al., 2016; WMO, 2023). Essas secas estão relacionadas a dois fenômenos oceânicos principais. Enquanto as secas de 2005 e 2010 foram especialmente relacionadas ao aumento da temperatura da superfície do Oceano Atlântico Tropical Norte, as secas ocorridas nos demais anos mencionados estiveram associadas ao aquecimento superficial do Oceano Pacífico Equatorial. Além disso, as secas em 2015/2016 e 2023/2024 (Figura 5) foram associadas ao aquecimento de ambos os oceanos (Aragão et al., 2018; WMO, 2023).



Fonte: Climate Reanalyzer / NOAA (2023).

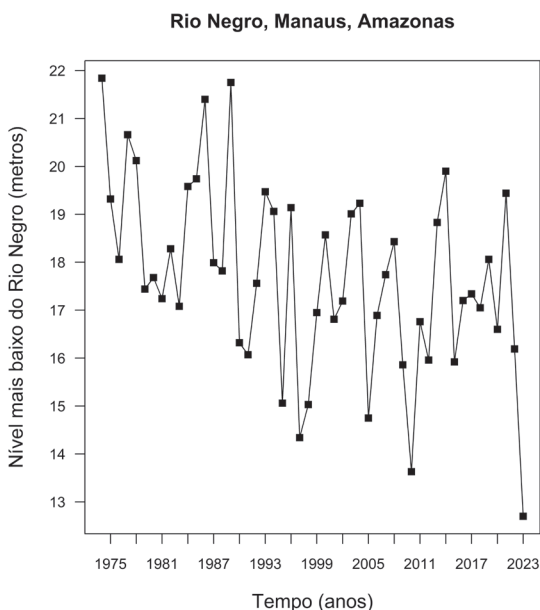
Figura 5 – Representação do mapa de anomalia da temperatura da superfície do mar (com base em uma climatologia de 1971 a 2000) no dia 22 de outubro de 2023, gerado a partir de estimativas de temperaturas obtidas por meio de uma combinação de observações de satélites, navios e boias.

A combinação das anomalias de temperatura da superfície das águas dos oceanos Atlântico Tropical Norte e Pacífico Equatorial intensifica a seca na Amazônia. As anomalias de precipitação média mensal associadas ao aquecimento do oceano Atlântico Tropical Norte mostram uma redução de aproximadamente 1 mm por dia de junho a novembro, e um secamento semelhante de 1 mm por dia de agosto a novembro associado ao aquecimento do Pacífico Equatorial (Harris et al., 2008). Essas anomalias de temperatura em ambos os oceanos resultam em uma estação seca mais longa na Amazônia (Harris et al., 2008; Fu et al., 2013). Isso ocorre porque o aquecimento dos oceanos altera a circulação atmosférica de grande escala, levando ar quente e seco para a Amazônia (Sampaio et al., 1999; Borma; Nobre, 2013).

As mudanças ocasionadas pelo aquecimento das águas superficiais do Oceano Pacífico Tropical (El Niño) afetam a evaporação e a formação de nuvens sobre o Pacífico (Borma; Nobre, 2013), reduzindo a convecção atmosférica e formação de nuvens convectivas nas regiões norte e leste da Amazônia (Sampaio,

1999). Por outro lado, mudanças no aumento da temperatura da superfície do Oceano Atlântico Tropical Norte estão diretamente relacionadas à redução das chuvas nas regiões noroeste e oeste da Amazônia, um fenômeno associado ao enfraquecimento dos ventos alísios (Borma; Nobre, 2013).

Ao observar a projeção gráfica da vazante do Rio Negro (Figura 6), é possível perceber tendências de secas no período de 1974 a 2023. Embora nenhum teste estatístico tenha sido aplicado, nota-se uma tendência de redução do nível mínimo do Rio Negro entre 1974 e 2023. No período de 1974 e 1989, a cota mínima esteve acima de 17 metros; no entanto, após esse período, incluindo os anos 1990, 1991 e 1995, foram registrados vários anos com a cota mínima abaixo de 16,6 metros. A cota mínima abaixo de 15 metros foi registrada pela primeira vez em 1997, repetindo-se em 2009, 2010 e 2023. Por fim, observa-se uma intensificação na redução da cota mínima na última década, quando eventos extremos ocorrendo de 2015, 2020, 2022 e 2023 (ANA, 2023).



Fonte: ANA (2023). Produzida pelos autores.

Figura 6 – Representação da cota mínima (vazante) do Rio Negro entre 1974 e 2023, com base nos dados da estação fluviométrica localizada no Porto de Manaus, Amazonas, Brasil.

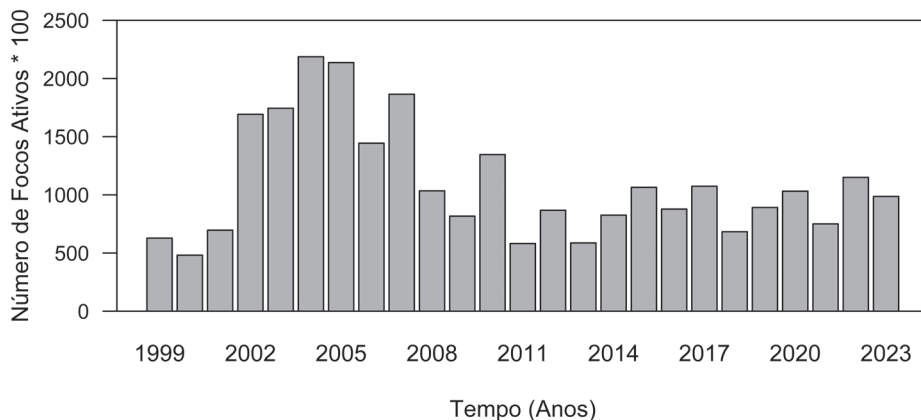
Outra tendência observada nos dados indica uma redução da cota mínima do rio em anos caracterizados por aquecimento anormal das águas superficiais dos oceanos Atlântico Tropical Norte e Pacífico Equatorial. No caso do aquecimento anormal do Oceano Tropical Norte, em 2005 o Rio Negro atingiu a cota mínima de 14,75 metros, e em 2010, 13,63 metros. Esses valores representaram o segundo e o terceiro menores níveis registrados historicamente. No que diz respeito ao aquecimento do Oceano Pacífico Equatorial, os anos 2023, com

12,7 metros, 1997, com 14,34 metros, e 1998, com 15,03 metros, representaram o primeiro, o terceiro e o quinto episódios de cota mínima do Rio Negro no período analisado (Figura 6).

Além da tendência de redução de umidade no solo, a atmosfera sobre a Amazônia também está se tornando mais seca (Barkhordarian et al., 2019). De fato, o aumento da temperatura global na superfície terrestre tem elevado a demanda da atmosfera por evaporação (IPCC, 2021) e aumentado exponencialmente o déficit de pressão de vapor (DPV) na atmosfera (Yuan et al., 2019). O aumento do DPV na Amazônia foi contínuo de 1979 a 2016, com picos em 2005, 2010 e 2015 (Barkhordarian et al., 2019). A tendência sistemática de seca atmosférica tem sido associada ao desmatamento e à fumaça proveniente dos incêndios florestais (Barkhordarian et al., 2019).

Incêndios florestais

Os focos de incêndios florestais no bioma Amazônia somaram 2.744.605 entre 1999 e 2023. Nesse período de 24 anos, o menor número ocorreu em 2000, com 48.168, enquanto o maior ocorreu em 2004, com 218.637 focos ativos. Os anos com mais focos de incêndios ocorreram entre 2002 e 2010, com mais de 100.000 focos por ano, exceto em 2009 com 81.682. Entre 2011 e 2023, o número médio de incêndios foi de 87.480, mas quatro dos últimos cinco anos registraram números superiores a essa média (Figura 7).



Fonte: Inpe (2024). Produzida pelos autores.

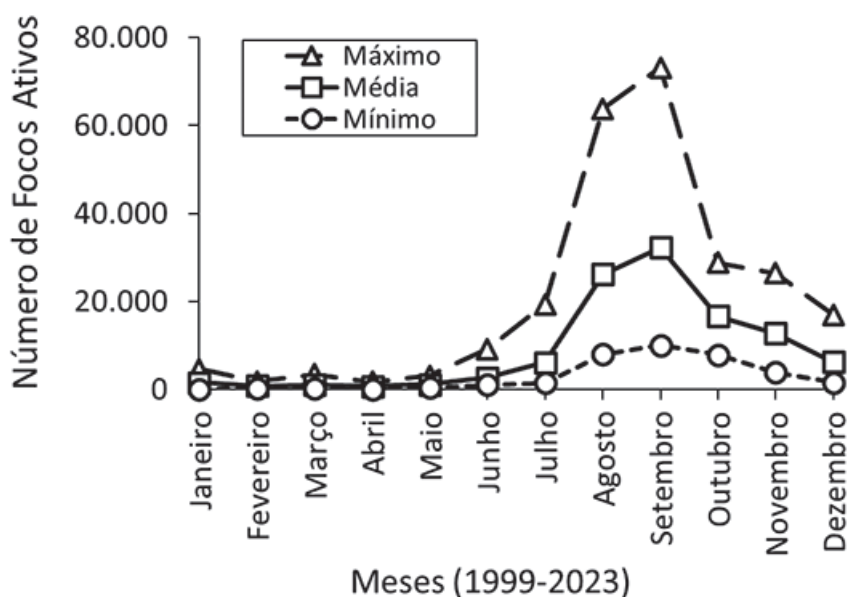
Figura 7 – Representação do número de focos de incêndios florestais ativos no bioma Amazônia entre 1999 e 2023, de acordo com dados do Programa Queimadas do INPE.

O fogo é mais frequente na Amazônia durante os meses de agosto, setembro e outubro (Figura 8). Esse período é caracterizado pela redução das chuvas na região, por fatores naturais como a variação sazonal da radiação solar e a migração da ZCIT para o norte da América do Sul. As mudanças nas condições hidrológicas tornam o solo e a atmosfera mais secos de agosto a outubro, au-

mentando a vulnerabilidade da floresta ao fogo, especialmente quando causado por atividades humanas.

As mudanças climáticas criam condições meteorológicas que favorecem a ocorrência e a manutenção de incêndios florestais (IPCC, 2021). Isso se deve ao aumento da temperatura, à redução da umidade do solo e do ar, e à ocorrência de eventos climáticos extremos, como secas e ondas de calor (Costa; Marengo, 2023). De fato, o número de focos de incêndios ativos na Amazônia tende a ser maior em anos de seca, como observado em 2005, 2007, 2010 e 2015 (Brando et al., 2014; Aragão et al., 2018). No entanto, a ocorrência de fogo na Amazônia está mais de 90% associada às atividades humanas insustentáveis e ilícitas (Mataveli et al., 2021; 2022; Silveira et al., 2022).

Uma variedade de atividades humanas promove incêndios florestais na Amazônia, incluindo o uso de fogo na floresta após o desmatamento para apropriação indevida da terra, a entrada de fogo na floresta devido ao corte seletivo de madeira, a limpeza de pastos com manejo ineficiente do fogo e o enfraquecimento da governança ambiental de combate ao fogo (Barlow et al., 2019). Além disso, organizações criminosas também têm atuado para queimar a floresta, como ocorreu em agosto de 2019 e 2022, um crime que tem sido denominado “dia do fogo” (MPF, 2019; MPMT, 2022).



Fonte: Programa Queimadas: Inpe (2024). Produzida pelos autores.

Figura 8 – Comparativo dos valores máximos, médios e mínimos de focos ativos ao longo dos meses, no período de 1999 a 2023, conforme dados do satélite AQUA_M-T.

Implicações das mudanças climáticas nos produtos florestais não madeireiros

O aumento de temperatura causa mudanças fisiológicas e ecológicas nas espécies de plantas que podem reduzir a produtividade vegetal. À medida que a temperatura aumenta, as reações químicas nas folhas intensificam, mas atingem um ponto máximo quando a estrutura enzimática é afetada pelo calor (Moore et al., 2021; Lopez et al., 2021). Isso resulta na redução da fotossíntese e, conseqüentemente, na menor conversão de dióxido de carbono e água em glicose, carboidratos, proteínas e gorduras presentes nos PFNM. Além disso, em relação aos fatores ecológicos, o aumento da temperatura reduz a atividade dos polinizadores, além de aumentar o volume de fumaça que reduz ainda mais a atividade dos polinizadores o que, combinado com as mudanças fisiológicas, resulta em baixa produção de frutos (Kitamura; Müller, 1984; Cavalcante et al., 2012).

Um exemplo da redução de produtividade ocasionada pelo aumento de temperatura foi observado sobre a espécie castanha-do-pará (Brandão et al., 2022). Quando a relação entre dados de volume de sementes e os dados climáticos de temperatura foram analisados, a variação na temperatura explicou entre 38% e 42% da variabilidade no volume de sementes de castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa* Bonpl.). Isso foi observado no Baixo Amazonas, no Pará, usando dados do período entre 1989 e 2019. Brandão e colaboradores encontraram que o volume médio de semente no Baixo Amazonas foi de 5.192 toneladas ao ano e que cada aumento de 1°C na temperatura foi associado a uma redução no volume de sementes que variou de 2.595 a 2.673 toneladas ao ano (Brandão et al., 2022).

As estimativas futuras também sugerem reduções na produtividade de PFNM nas próximas décadas. As mudanças climáticas, ocasionadas pelo aumento de temperatura, podem reduzir de 4% a 70% a área de adequação ambiental de quinze espécies de plantas altamente empregadas na sociobioeconomia da Amazônia (Evangelista-Vale et al., 2021; Igawa et al., 2022). Essas reduções são estimadas para ocorrer em 2050 para espécies como açaí (*Euterpe* spp.), cacau (*Theobroma cacao* L.) e castanha-do-pará. Outras espécies que fornecem importantes PFNM e cujas populações foram estimadas para reduzir incluem copaíba (*Copaifera multijuga* Hayne), cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* (Willd. ex Spreng.) K.Schum.) e andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.).

Por outro lado, algumas espécies foram estimadas para aumentarem suas áreas de adequação ambiental entre 22% e 100% até 2050 (Evangelista-Vale et al., 2021), como as palmeiras *Astrocaryum aculeatum* G.Mey., *Astrocaryum murumuru* Mart. e *Attalea speciosa* Mart. De fato, observações de campo já mostraram o aumento do gênero *Astrocaryum* spp. em florestas que foram desmatadas e abandonadas no Pará (Lima et al., 2013). Além disso, a espécie de palmeira baçaçu (*A. speciosa*) está aumentando sua população em terras que foram utilizadas como pasto e depois foram abandonadas, onde representaram de 12% a 50% da cobertura vegetal em regeneração (Feigl et al., 2006; Rocha et al., 2016).

A redução de água na atmosfera e no solo causa preocupação quanto à saúde da floresta. O aumento do DPV causa efeitos fisiológicos sobre as plantas, provavelmente reduzindo a fotossíntese e aumentando a mortalidade devido às mudanças nas trocas gasosas (condutância estomática) (Mcdowell; Allen, 2015). O aumento do DPV é a principal consequência negativa das mudanças climáticas na produtividade ecossistêmica bruta da Amazônia (Smith et al., 2020). O déficit de água reduz o fluxo de seiva dentro da planta entre 35% e 70%, sendo uma resposta à combinação de embolia e fechamento estomático (Fontes et al., 2018). A combinação de seca atmosférica e no solo torna a vegetação desnutrida e mais susceptível aos efeitos do calor e dos incêndios florestais (Fontes et al., 2018; IPCC, 2021).

Foi mostrado que a combinação entre secas e incêndios florestais aumenta a mortalidade de árvores de 2 a 4 vezes na Amazônia (Barlow; Peres, 2008). Após um segundo incêndio, a estrutura física da floresta é modificada de forma severa e o número de espécies é reduzido significativamente (Barlow; Peres, 2008). Os incêndios florestais causam lesões em raízes, troncos e copas. Isso causa extinção local e mudanças na composição de espécies, alterando a composição e densidade dos PFNM. As populações das espécies *Vismia* spp, *Cecropia* spp e *Bellucia* spp. (Longworth et al., 2014; Mesquita et al., 2015) são exemplos de populações em crescimento nas florestas amazônicas degradadas, com dossel aberto e fogo recorrente, mas essas espécies ainda não são utilizadas como PFNM na região (Brandão et al., 2021).

Portanto, a ocorrência e a tendência de aumento de fenômenos climáticos relacionados às atividades humanas, como a elevação de temperatura, as secas e os incêndios florestais, causam mudanças na produtividade vegetal e na distribuição geográfica das espécies fornecedoras de PFNM. Isso causa alterações na composição de espécies. Enquanto algumas espécies reduzem a produtividade e a distribuição geográfica, outras espécies aumentam essas características. Assim, de diversas formas, as mudanças climáticas têm impactado os PFNM na Amazônia.

Implicações das mudanças climáticas na sociobioeconomia

As implicações das mudanças climáticas na sociobioeconomia foram discutidas considerando processos: (i) industriais e (ii) nutricionais. Porém, se reconhece que outros processos ligados à sociobioeconomia da Amazônia devem ser influenciados pelas mudanças climáticas, como processos logísticos e econômicos na região (Costa; Marengo, 2023), mas esses não foram discutidos no presente estudo. Portanto, as mudanças climáticas devem impactar outros processos inerentes à sociobioeconomia da Amazônia além dos discutidos a seguir.

A redução de produtividade ecossistêmica causada pelas mudanças climáticas pode impactar o potencial industrial da Amazônia. De fato, os extrativistas reduziram suas atividades onde os PFNM foram diminuídos no Pará (Shanley; Luz, 2003) e a disponibilidade de PFNM também foi reduzida nas regiões amazônicas mais desmatadas (Brandão et al., 2021). Relatos semelhantes foram

feitos por Povos Indígenas das etnias Baniwa, Paiter-Suruí, Munduruku e Kichwa (Baniwa et al., 2023) e, sendo recorrentes, podem acarretar um futuro com menos PICL envolvidos com o desenvolvimento da sociobioeconomia em consequência da redução do volume e da variedade de PFM.

Por outro lado, as espécies que estão aumentando sua produtividade nas florestas preservadas (Pau et al., 2018) ou nas áreas degradadas (Lima et al., 2013) podem representar possibilidades de crescimento no volume de PFM. Por exemplo, com o aumento na quantidade de frutos da palmeira tucumã (*Astrocaryum vulgare* Mart.) em florestas degradadas no Pará (Lima et al., 2013), foi viabilizado o início da produção de gordura vegetal extraída de sua amêndoa. Isso aconteceu na Cooperativa Mista dos Agricultores Familiares dos Caetés sem a necessidade de incremento tecnológico nos equipamentos industriais de processamento de gordura vegetal (Brandão, 2023). No entanto, o conhecimento sobre os efeitos positivos de mudanças climáticas em processos industriais ainda é escasso.

Finalmente, este estudo permitiu interpretar que as mudanças climáticas são ameaças à segurança alimentar dos PICL da região amazônica. O fato de o aumento de temperatura reduzir a produção vegetal, como as sementes de castanha-do-pará (Brandão et al., 2023), a saúde das populações amazônicas que consomem PFM pode ser comprometida mesmo com o objetivo do Acordo de Paris de manter o aquecimento global entre 1,5°C e 2°C. De fato, essa elevação de temperatura pode acarretar perdas de proteínas, gorduras, carboidratos, cálcio, ferro, potássio, selênio e outros nutrientes presentes nos PFM da Amazônia. Isso pode aumentar os riscos de doenças relacionados ao déficit nutricional, reduzindo a mão de obra e agravando os problemas sociais na região.

Soluções baseadas na natureza para apoiar a sociobioeconomia da Amazônia

Como foi apresentado e discutido nas seções anteriores, as mudanças climáticas associadas às tendências de aumento de temperatura do ar, ocorrência de secas e incêndios florestais têm levado a floresta amazônica aos chamados pontos de não retorno. A elevação de temperatura entre 1,5°C e 2°C parece suficiente para impactar negativamente o ciclo biológico de muitas espécies prestadoras de serviços ambientais, como espécies polinizadoras (Giannini et al., 2020) e provedoras de NTFP (Evangalista-Vale et al., 2021). Diante dessa tendência, soluções baseadas na natureza são essenciais para mitigar os riscos associados ao rompimento dos limiares que sustentam a estabilidade ambiental da Amazônia.

Soluções baseadas na natureza incluem ações de remoção de carbono da atmosfera e estoque sobre a superfície terrestre, produção florestal e agricultura regenerativa em terras restauradas e bioindustrialização para agregar valor aos produtos primários regionais. No contexto da sociobioeconomia, a geração e o fornecimento de bens e produtos a partir da (i) restauração e conservação de floresta e do (ii) processamento bioindustrial de produtos nativos são práticas

alinhadas com as soluções baseadas na natureza (Garrett et al., 2023). Portanto, essas iniciativas foram debatidas nesta seção, de modo a fornecer uma compreensão de como apoiar a sociobioeconomia da Amazônia.

No contexto de restauração e conservação de floresta na Amazônia, a iniciativa Arcos da Restauração foi criada a partir de estudos produzidos pelo Painel Científico para a Amazônia (Barlow et al., 2022). A iniciativa busca restaurar 500 mil km² em duas regiões amazônicas. Uma região está localizada no sul da Amazônia, em territórios do Brasil e da Bolívia, e se estende até a costa atlântica brasileira nos estados do Pará e do Maranhão. A outra região do Arcos da Restauração está localizada ao longo da cordilheira do Andes, incluindo territórios no Peru, no Equador, na Colômbia e na Venezuela. A iniciativa Arcos da Restauração no território brasileiro foi endossada pelo governo nacional (BNDES, 2023), sendo lançada na 28^o Conferência das Partes (COP28), em Dubai, Emirados Árabes, em 2023.

Em termos de quantitativo, o projeto Arcos da Restauração no Brasil tem por objetivo restaurar 24 milhões de hectares de florestas até 2050. Em termos de investimento financeiro, a iniciativa está dividida em duas fases. A primeira fase busca restaurar 6 milhões de hectares até 2030. Para iniciar isso, o governo brasileiro disponibilizou U\$ 200 milhões e estimou a necessidade de financiamento de U\$ 10 bilhões. A segunda fase busca restaurar 18 milhões de hectares de 2030 a 2050, com investimento previsto de U\$ 30 bilhões. O Brasil considera que recursos financeiros internacionais são essenciais para implementar o projeto de forma plena (BNDES, 2023).

Os produtos florestais originados da restauração florestal podem impulsionar estratégias de associativismo e cooperativismo entre os PICL. Porém, há uma significativa carência de bioindústrias com potencial para agregar valor aos produtos florestais regionais na Amazônia (Barata, 2012; Brandão et al., 2021). As bioindústrias referem-se aos empreendimentos com infraestruturas e tecnologias capazes de transformar os produtos primários em produtos industrializados com 2 a 10 vezes mais valor agregado (Nobre; Nobre, 2018; Nobre; Nobre, 2019; Amazonia 4.0, 2023).

Portanto, além de eliminar o desmatamento e a degradação florestal e de evitar que o aquecimento global ultrapasse 1,5°C, investir na restauração florestal e na bioindustrialização é essencial como estratégia para apoiar a sociobioeconomia da Amazônia. Isso será fundamental para construir predominantemente uma sociedade de classe média em toda a Amazônia, conservando as florestas saudáveis e em pé e os rios fluindo. É essencial incluir os Povos Indígenas e comunidades locais e seus conhecimentos nessa estratégia, visando a justiça social, a ampla repartição de benefícios e a redução das desigualdades.

Referências

- ABRAMOVAY, R. et al. Opportunities and challenges for a healthy standing forest and flowing rivers bioeconomy in the Amazon. In: NOBRE, C. A. et al. *Amazon Assessment Report* (UN-SDSN), 2021. doi:10.55161/UGHK1968.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Porto de Manaus: Nível do Rio Negro. Níveis Máximo e Mínimo. 2023. Disponível em: <<https://www.portodemanaus.com.br/?pagina=niveis-maximo-minimo-do-rio-negro>>. Acesso: 23 mar. 2024.
- ALMEIDA C. T. et al. Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973-2013. *International Journal of Climatology*, v.37, n.4, p. 2013-2026, 2016. <https://doi.org/10.1002/joc.4831>
- ALVES, L. M. et al. Classificação de anos de seca. In: BORMA, L. S. B; NOBRE, C. *Secas na Amazônia: causas e consequência*. São Paulo: Oficina de Texto, 2013.
- AMAZONIA 4.0. Laboratórios Criativos da Amazônia. 2023. Disponível em: <<https://amazonia4.org/lca/>>. Acesso: 30 maio 2023.
- ARAGÃO, L. E. O. C. et al. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications*, v.9, n.536, p.1-12, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). Brasil anuncia R\$ 1 bi para Arco de Restauração, com R\$ 450 milhões já aprovados do Fundo Amazônia. 2023. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/>>. Acesso: 15 dez. 2023.
- BANIWA, A. et al. *Somos Amazônia: saberes, desafios e visão de futuro dos povos da floresta*. 2023. Disponível em: <<https://abori.com.br/>>. Acesso: 23 abr. 2024.
- BARATA, L. E. S. A economia verde: Amazônia. *Ciência e Cultura*, v.64, n.3, p.31-5, 2012. <http://dx.doi.org/10.21800/S0009-67252012000300011>
- BARKHORDARIAN, A. et al. A recent systematic increase in vapor pressure deficit over tropical South America. *Scientific Reports*, v.9, n.15331, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51857-8>
- BARLOW, J. et al. *Transforming the Amazon through 'Arcs of Restoration'*. New York: Science Panel for the Amazon, Policy Brief (UN-SDSN), 2022. DOI: 10.55161/KJCS2175
- BARLOW, J. et al. Clarifying Amazonia's burning crisis. *Global Change Biology*, v.26, n.2, 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14872>
- BARLOW, J.; PERES, C. A. Fire-mediated dieback and compositional cascade in an Amazonian forest. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v.363, n.1498, p.1787-94, 2008.
- BORMA, L. S.; NOBRE, C. A. *Secas na Amazônia: causas e consequências*. São Paulo: Oficina de Texto, 2013.
- BRANDÃO D. O. *Desmatamento na Amazônia e influência nos produtos florestais não-madeireiros de uso econômico local*. São José dos Campos. 2023. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

- BRANDÃO, D. O. et al. The effects of Amazon deforestation on non-timber forest products. *Regional Environmental Change*, v.21, n.4, p.122, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01836-5>.
- BRANDÃO, D. O.; ARIEIRA, J.; NOBRE, C. A. Threats and Sustainability of Brazil Nut (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) Pre-Industrialization in the Amazon Region. In: LOUSADA, S. A. N. *Land-Use Management - Recent Advances, New Perspectives, and Applications*. London: Intechopen, 2023. p.145-469. DOI: 10.5772/intechopen.113715.
- BRANDÃO, D. O.; BARATA, L. E. S.; NOBRE, C. A. The Effects of Environmental Changes on Plant Species and Forest Dependent Communities in the Amazon Region. *Forests*, v.13, n.466, 2022. <https://doi.org/10.3390/fl3030466>.
- BRANDO, P. M. et al. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v.111, n.17, p. 6347-52, 2014. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305499111>.
- BRONDIZIO, E. S. et al. Social and health dimensions of climate change in the Amazon. *Annals of Human Biology*, v.43, n.4, p.405-414. 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/03014460.2016.1193222>.
- CAVALCANTE, M. C. et al. Pollination requirements and the foraging behavior of potential pollinators of cultivated Brazil nut (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) trees in Central Amazon rainforest. *Psyche*, v.2012, n.978019, 2012. DOI: 10.1155/2012/978019.
- COSTA, F.; MARENGO, J. *Statement on the 2023 Amazon drought and its unforeseen consequences*. New York: Science Panel for the Amazon, Policy Brief (UN-SDSN), 2023.
- DINIZ, F. A.; RAMOS, A. M.; REBELLO, E. R. G. Brazilian climate normals for 1981–2010. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.53, n.2, p.131-43, 2018. DOI: 10.1590/S0100-204X2018000200001.
- ESQUIVEL-MUELBERT, A. et al. Compositional response of Amazon forests to climate change. *Global Change Biology*, v.25, n.1, p.39-56, 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14413>.
- EVANGELISTA-VALE, J. C. et al. Climate change may affect the future of extractivism in the Brazilian Amazon. *Biological Conservation*, v.257, n.109093, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109093>.
- FEIGL, B. et al. Biological survey of a low-productivity pasture in Rondônia state, Brazil. *Outlook on Agriculture*, v.35, n.3, p.199-208, 2006. <https://doi.org/10.5367/000000006778536738>.
- FLORES, B. M. et al. Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature*, v.626, p.555-64, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0>.
- FONTES, C. G. et al.. Dry and hot: the hydraulic consequences of a climate change-type drought for Amazonian trees. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v.373, n.1760, p.1-12, 2018. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0209>.
- FU, R. et al. Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. *Environmental Sciences*, v.110, n.45, p.18110-18115, 2013. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302584110>.
- GARRETT, R. et al. *Supporting sociobioeconomies of healthy standing forests and flowing rivers in the Amazon*. New York: Science Panel for the Amazon, Policy Brief (UN-SDSN), 2023.

- GIANNINI, T. C. et al.. Climate change in the Eastern Amazon: crop-pollinator and occurrence-restricted bees are potentially more affected. *Regional Environmental Change*, v.20, n.9, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01611-y>.
- HARRIS, P. P.; HUNTINGFORD, C.; COX, P. M. Amazon Basin climate under global warming: the role of the sea surface temperature. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. v.363, n.1498, 2008. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.0037>.
- HIROTA, M. et al. Resilience of the Amazon forest to global changes: Assessing the risk of tipping points. In: NOBRE, C. A. et al. *Amazon Assessment Report* (UN-SDSN), 2021. Doi: 10.55161/QPYS9758.
- IGAWA, T. K.; TOLEDO, P. M. D.; ANJOS, L. J. S. Climate change could reduce and spatially reconfigure cocoa cultivation in the Brazilian Amazon by 2050. *PLoS ONE*, v.17, n.1, e0262729, 2022. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262729>.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo 2022 [Internet]. 2023. Disponível em: <<https://censo2022.ibge.gov.br/>>. Acesso: 30 set. 2023.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). IBGE atualiza Mapa da Amazônia Legal. 2020. <Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/>>. Acesso: 19 jul. 2024.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Mapa de vegetação do Brasil. Escala 1:5.000.000. 2004. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso: 16 nov. 2018.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL (INMET). Dados Meteorológicos [Internet]. 2024. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>>. Acesso: 28 mar. 2024.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Programa Queimadas do INPE [Internet]. 2024. Disponível em: <<https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/portal/>>. Acesso: 14 fev. 2024.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Terrabrasilis [Internet]. 2023. Disponível em: <<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/>>. Acesso: 22 mar. 2023.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate change 2021: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. et al. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. *Scientific Reports*, v.6, n.33130, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep33130>.
- KITAMURA, P. C.; MÜLLER, C.H. Castanhais nativas de Marabá-PA: Fatores de depredação e bases para a sua preservação. *Embrapa, Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido*, v.30, p.1-32, 1984.
- LIMA, L. P. et al. Ocorrência e usos do tucumã (*Astrocaryum vulgare* mart.) em comunidades ribeirinhas, quilombolas e de agricultores tradicionais no município de Irituia, Pará. *Amazônica Revista de Antropologia*, v.5, n.1, p.762-778, 2013. <http://dx.doi.org/10.18542/amazonica.v5i3.1604>.
- LONGWORTH, J. B. et al. Shifts in Dominance and Species Assemblages over Two Decades in Alternative Successions in Central Amazonia. *Biotropica*, v.46, n.5, p.529-37, 2014. <https://doi.org/10.1111/btp.12143>.

LOPES, E. et al. Mapping the socio-ecology of non timber forest products (NTFP) extraction in the Brazilian Amazon: the case of açaí (*Euterpe precatoria* Mart) in Acre. *Landscape and Urban Planning*, v.188, p.110-117, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.08.025>

LÓPEZ, J.; WAY, D. A.; SADOK, W. Systemic effects of rising atmospheric vapor pressure deficit on plant physiology and productivity. *Global Change Biology*, v.27, n.9, p.1704-20, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.08.025>

MATAVELI, G. et al. Record-breaking fires in the Brazilian Amazon associated with uncontrolled deforestation. *Nature Ecology & Evolution* v.6, p.1792-3, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01945-2>

MATAVELI, G. A. V. et al. Relationship between Biomass Burning Emissions and Deforestation in Amazonia over the Last Two Decades. *Forests*, v.12, n.1217, 2021. <https://doi.org/10.3390/f12091217>

MCDOWELL, N. G.; ALLEN, C. D. Darcy's law predicts widespread forest mortality under climate warming. *Nature Climate Change*, v.5, n.7, p.669-672. 2015. <https://doi.org/10.1038/nclimate2641>

MESQUITA, R. C. G. et al. Amazon rain forest succession: stochasticity or land-use legacy? *Bioscience*, v.65, n.9, p.849-861, 2015. <https://doi.org/10.1093/biosci/biv108>

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE MATO GROSSO (MPMT). Supostos organizadores do Dia do Fogo são alvos de operação em Colniza. 2022. Disponível em: <<https://www.mpmt.mp.br/conteudo/58/115922/supostos-organizadores-do-dia-do-fogo-sao-alvos-de-operacao-em-colniza>>. Acesso: 22 fev. 2024.

MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL (MPF). MPF apura aumento no desmatamento e nas queimadas na Amazônia, em investigações em Santarém, Itaituba, Altamira e Belém. 2019. Disponível em: <<https://www.mpf.mp.br/pa/sala-de-imprensa/noticias-pa/mpf-apura-aumento-no-desmatamento-e-nas-queimadas-na-floresta-amazonica-em-investigacoes-em-santarem-itaituba-altamira-e-belem>>. Acesso: 22 fev. 2024.

MOORE, C. E. et al. The effect of increasing temperature on crop photosynthesis: From enzymes to ecosystems. *Journal of Experimental Botany*, v.72, n.8, p.2822-44, 2021. Doi: 10.1093/jxb/erab090

NATIONAL OCEANIC ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). Climate Reanalyzer. GFS 2m Temperature (°C). 2023. Acesso: 22 out. 2023.

NOBRE, C. A. et al. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, v.113, n.39, p.10759-68, 2016. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>

NOBRE, I.; NOBRE, C. A. The Amazonia third way initiative: the role of technology to unveil the potential of a novel tropical biodiversity-based economy. In: LOURES, L. C. (Ed.). *Land use: assessing the past, envisioning the future*. London: IntechOpen, 2018. v.1, p.183-213. Doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.80413>.

NOBRE, I.; NOBRE, C. 'Amazon 4.0' project: Defining a third way for the Amazon. *Futuribles*, n.3, p.95-108, 2019. Doi: <https://doi.org/10.3917/futur.434.0095>.

PAU, S. et al. Long-term increases in tropical flowering activity across growth forms in response to rising CO₂ and climate change. *Global Change Biology*, v.24, n.5, p. 2105-2116, 2018. Doi: 10.1111/gcb.14004.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2023. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. 2023.

ROCHA, G. P. E.; VIEIRA, D. L. M.; SIMON, M. F. Fast natural regeneration in abandoned pastures in southern Amazonia. *Forest Ecology and Management*, v.370, p. 93-101, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.05>

SALAZAR, L. F.; NOBRE, C. A.; OYAMA, M. D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. *Geophysical Research Letters*, v.34, n.9, p. L09708, 2007. <https://doi.org/10.1029/2007GL029695>

SAMPAIO, G. O *El Niño e você: o fenômeno climático*. São José dos Campos: Transtec Editorial; 1999. 116p.

SCIENCE PANEL FOR THE AMAZON (SPA). 2021. Amazon Assessment Report 2021. Nobre C, Encalada A, Anderson E, Roca Alcazar FH, Bustamante M, Mena C, Peña-Claros M, Poveda G, Rodriguez JP, Saleska S, Trumbore S, Val AL, Villa Nova L, Abramovay R, Alencar A, Rodríguez Alzza C, Armenteras D, Artaxo P, Athayde S, Barretto Filho HT, Barlow J, Berenguer E, Bortolotto F, Costa FA, Costa MH, Cui N, Fearnside PM, Ferreira J, Flores BM, Frieri S, Gatti LV, Guayasamin JM, Hecht S, Hirota M, Hoorn C, Josse C, Lapola DM, Larrea C, Larrea-Alcazar DM, Lehm Ardaya Z, Malhi Y, Marengo JA, Melack J, Moraes R M, Moutinho P, Murmis MR, Neves EG, Paez B, Painter L, Ramos A, Rosero-Peña MC, Schmink M, Sist P, ter Steege H, Val P, van der Voort H, Varese M, Zapata-Ríos G (Eds). United Nations Sustainable Development Solutions Network, New York, USA. Disponível em: <<https://www.the-amazonwewant.org/spa-reports/>>. 2021.

SHANLEY, P.; LUZ, L. The impacts of forest degradation on medicinal plant use and implications for health care in eastern Amazonia. *Bioscience*, v.53, n.6, p.573-84, 2003. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0573:TIOFDO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0573:TIOFDO]2.0.CO;2)

SILVEIRA, M. V. F. et al. Amazon fires in the 21st century: The year of 2020 in evidence. *Global Ecology and Biogeography*, v.31, n.10. p.2026-40, 2022. <https://doi.org/10.1111/geb.13577>

SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA QUANTUM (QGIS). Version 3.28 Firenze. QGIS Team. Chicago, United States: *Open Source Geospatial Foundation*; 2024.

SMITH, M. N. et al. Empirical evidence for resilience of tropical forest photosynthesis in a warmer world. *Nature Plants*, v.6, p.1225-30, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-00780-2>

STAAL, A. et al. Hysteresis of tropical forests in the 21st century. *Nature Communications*, v.11, n.4978, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18728-7>

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). State of the Global Climate 2023. WMO-No. 1347. ISBN 978-92-63-11347-4. 2024.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). WMO Global Annual to Decadal Climate Update (Target years: 2023-2027) [Internet]. 2023. Disponível em: <https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=22272>. Acesso: 18 Maio 2023.

YUAN, W. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. *Science advances*, v.5, n.8, p.1-12, 2019. DOI: 10.1126/sciadv.aax1396.

RESUMO – A floresta amazônica passou por mudanças climáticas significativas nos últimos 50 anos. Para combater as causas das mudanças climáticas, promover o desenvolvimento sustentável e apoiar Povos Indígenas e comunidades locais na região, o Painel Científico para a Amazônia introduziu o conceito de uma sociobioeconomia de saudáveis florestas em pé e rios fluindo. No entanto, a Amazônia está em perigo de ultrapassar um ponto de não retorno, o limiar que sustenta a estabilidade ambiental da floresta, o que deve dificultar a implementação da sociobioeconomia e agravar os problemas sociais e ambientais na região. Neste estudo, analisamos os impactos do aquecimento global, mudanças de usos da terra, secas extremas e incêndios florestais na provisão de serviços ecossistêmicos e discutimos soluções baseadas na natureza para fortalecer a sociobioeconomia da região amazônica.

PALAVRAS-CHAVE: Aquecimento global, Incêndios florestais, Produtos florestais não madeireiros, Secas extremas, Soluções baseadas na natureza.

ABSTRACT –The Amazon rainforest has undergone significant climate changes in the last 50 years. To combat the drivers of climate change, promote sustainable development, and empower Indigenous Peoples and local communities in the region, the Science Panel for the Amazon has introduced the concept of a socio-bioeconomy of healthy standing forests and flowing rivers. However, the Amazon is in danger of surpassing a tipping point, the threshold that sustains the environmental stability of the forest, which may hinder the implementation of the socio-bioeconomy and worsen social and environmental problems in the region. In this study, we analyze the impacts of global warming, land use change, extreme droughts, and forest fires on the provision of ecosystem services and discuss nature-based solutions to strengthen the socio- bioeconomy of the Amazon region.

KEYWORDS: Global warming, Forest fires, Non-timber forest products, Extreme droughts, Nature-based solutions.

Diego Oliveira Brandão é graduado em Ciências Biológicas, mestre em Ecologia e doutor em Ciência do Sistema Terrestre. Atualmente, é membro da Secretaria Técnico-Científica do Painel Científico para a Amazônia. @ – diegobrandao779@gmail.com / <https://orcid.org/0000-0002-9443-8024>.

Julia Arieira é graduada em Ciências Biológicas, mestre em Ecologia e Conservação da Biodiversidade e doutora em Agricultura Tropical. Atualmente, é membro da Secretaria Técnico-Científica do Painel Científico para a Amazônia. @ – juarieira@gmail.com / <https://orcid.org/0000-0003-4419-6327>.

Carlos A. Nobre é graduado em Engenharia Eletrônica e doutor em Meteorologia. Atualmente, é pesquisador do Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo e copresidente do Painel Científico para a Amazônia. @ – cnobre.res@gmail.com / <https://orcid.org/0000-0002-5808-8784>.

Recebido em 30.4.2024 e aceito em 22.7.2024.

^{I, II} Painel Científico para a Amazônia, Secretaria Técnico-Científica, São José dos Campos, Brasil.

^{III} Universidade de São Paulo, Instituto de Estudos Avançados, São Paulo, Brasil.