

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Equilíbrio bioclimático e o crescimento da vegetação secundária na Amazônia
brasileira**

Viviane de Paula Fialho
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

VIVIANE DE PAULA FIALHO

Equilíbrio bioclimático e o crescimento da vegetação secundária na Amazônia brasileira

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Gabrielle Ferreira Pires

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

F438e
2025 Fialho, Viviane de Paula, 1996-
Equilíbrio bioclimático e o crescimento da vegetação
secundária na Amazônia brasileira / Viviane de Paula Fialho. –
Viçosa, MG, 2025.
1 dissertação eletrônica (41 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Gabrielle Ferreira Pires.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2025.

Referências bibliográficas: f. 36-41.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.388>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Floresta amazônica - Efeito das mudanças climáticas.
2. Florestas - Reprodução - Amazônia. 3. Revegetação -
Amazônia. I. Pires, Gabrielle Ferreira, 1987-. II. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada.
III. Título.

CDD 22. ed. 577.32209811

VIVIANE DE PAULA FIALHO

Equilíbrio bioclimático e o crescimento da vegetação secundária na Amazônia brasileira

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 5 de março de 2025.

Assentimento:

Viviane de Paula Fialho
Autora

Gabrielle Ferreira Pires
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 05/06/2025 às 15:40:00 e pela orientadora em 05/06/2025 às 15:47:57. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **NSYP.R43K.KAA9** e clique no botão 'Validar documento'.

*Ao meu pai José das Graças Fialho (in memoriam).
Á minha mãe Maria dos Anjos Paula Fialho.
Dedico com muito amor.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, José das Graças Fialho (in memoriam), pelo exemplo de vida e respeito à natureza. Ele não sabia o significado de vegetação secundária, equilíbrio bioclimático e afins, mas entendia a importância de preservar e respeitar os limites impostos pela natureza, sempre passando isso adiante.

À minha mãe, Maria dos Anjos, pelo incentivo de uma vida inteira, por apoiar minhas escolhas, por sempre estar ao meu lado, e principalmente por acreditar que um dia eu me tornaria mestre, quando nem eu mesma acreditava.

Ao meu irmão, Vinicio, pelo apoio, companhia e tantos momentos de alegria e descontração.

À minha orientadora, professora Gabrielle por confiar em mim para realização deste trabalho e por disponibilizar as ferramentas para que possamos trilhar nosso próprio caminho, sempre explorando que há de melhor em cada um.

À Marina, Humberto, Laís, Taison, Paulo, Guilherme, Nathan e Raoni pela companhia ao longo dos últimos anos e, principalmente, por tornarem o CLIMAP um ambiente tão unido e agradável.

À todas as minhas amigas e amigos por compartilharem as dores e as alegrias da vida adulta, tornando esse período mais leve e suportável. Em especial a Bruna, Miriã, Josimar,

Lully e Tatiane que estiveram ao meu lado nos momentos bons e ruins.

À Miriã que além de uma grande amiga é a melhor roommate que existe, tornando o 37 um lugar para o qual eu desejo voltar todos os dias. Agradeço também pelas valiosas contribuições dadas ao meu trabalho.

À Livinha pela disposição em sempre sanar minhas dúvidas de programação e por mais uma vez, aceitar o convite para fazer parte da minha banca avaliadora.

À professora Hewlley por dispor do seu tempo e aceitar o convite para fazer parte da minha banca avaliadora.

À Graça, por ser uma profissional incrível, por toda disposição e por facilitar as burocracias da pós-graduação.

A todos os professores do programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada pelos ensinamentos compartilhados nos últimos anos.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola por dispor das condições necessárias de trabalho e a todos os funcionários pela dedicação.

À UFV e à cidade de Viçosa por me acolherem e serem minha casa a tantos anos. Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

À todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para tornar esse momento realidade.

*“Quem costuma vir de onde eu sou às vezes não tem motivos para seguir.
Então levanta e anda, vai, levanta e anda.”
(Emicida - Levanta e anda feat. Rael)*

RESUMO

FIALHO, Viviane de Paula, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2025. **Equilíbrio bioclimático e o crescimento da vegetação secundária na Amazônia brasileira.** Orientadora: Gabrielle Ferreira Pires.

A resiliência da floresta Amazônica diante das mudanças climáticas e do uso da terra tem se tornado uma questão crucial. No entanto, observa-se que as atividades antrópicas vêm reduzindo essa resiliência, aproximando a Amazônia de um ponto crítico de desequilíbrio bioclimático. O desmatamento, o uso intensivo da terra e a consequente queda da produtividade agropecuária podem levar ao abandono de áreas, permitindo o crescimento da vegetação secundária. Apesar da crescente importância desse tema, ainda são escassos os estudos que avaliam o potencial de transição bioclimática levando em conta a regeneração florestal proporcionada pela vegetação secundária. Assim, este estudo busca preencher essa lacuna ao quantificar variáveis como precipitação, evapotranspiração, déficit hídrico e o crescimento da vegetação secundária. Os resultados indicam que o desenvolvimento da vegetação secundária consegue influenciar de forma positiva para manutenção do equilíbrio bioclimático na região Central. Na região Leste, é possível observar que a presença da vegetação secundária, por mais importante que seja, não consegue garantir que o risco de transição climática da região seja mitigado, uma vez que o efeito sobre o regime de chuvas é positivo, mas desfavorável em relação ao déficit hídrico. Por outro lado, na região Sul, o crescimento da vegetação secundária não é suficiente para manter condições climáticas adequadas ao desenvolvimento das florestas. Mesmo com a regeneração florestal, partes importantes do bioma ainda estão em risco de passarem pela transição climática.

Palavras-chave: Vegetação secundária; Equilíbrio bioclimático; Regeneração Florestal.

ABSTRACT

FIALHO, Viviane de Paula, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2025. **Bioclimatic equilibrium and the growth of secondary vegetation in the Brazilian Amazon.** Adviser: Gabrielle Ferreira Pires.

The resilience of the Amazon rainforest to climate change and land use has become a critical issue. However, anthropogenic activities have been reducing this resilience, bringing the Amazon closer to a critical threshold of bioclimatic imbalance. Deforestation, intensive land use, and the consequent decline in agricultural productivity can lead to land abandonment, allowing for the growth of secondary vegetation. Despite the increasing relevance of this topic, studies evaluating the bioclimatic transition potential considering forest regeneration through secondary vegetation remain scarce. This study aims to fill this gap by quantifying variables such as precipitation, evapotranspiration, water deficit, and secondary vegetation growth. The results indicate that the development of secondary vegetation positively contributes to maintaining bioclimatic stability in the Central region. In the Eastern region, despite the importance of secondary vegetation, its presence alone is insufficient to mitigate the risk of climatic transition, as its effect on rainfall patterns is positive but unfavorable concerning the water deficit. Conversely, in the Southern region, the growth of secondary vegetation is not enough to sustain climatic conditions suitable for forest development. Even with forest regeneration, critical areas of the biome remain at risk of undergoing climatic transition.

Keywords: Secondary vegetation; Bioclimatic equilibrium; Forest regeneration.

*Ao meu pai José das Graças Fialho (in memoriam).
Á minha mãe Maria dos Anjos Paula Fialho.
Dedico com muito amor.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição da vegetação secundária na Amazônia brasileira no ano de 2019	17
Figura 2 - Diagrama Bioclimático Malhi et al., 2009.....	20
Figura 3 - Crescimento da vegetação secundária na Amazônia brasileira entre os anos de 2001 e 2019	234
Figura 4 - Comparativo entre as áreas de vegetação secundária, em hectares, na Amazônia nos anos de 2001 (a) e 2019 (b).	245
Figura 5 - Precipitação total anual na Amazônia brasileira entre os anos de 2001 e 2019	266
Figura 6 - Evapotranspiração total anual na Amazônia brasileira entre os anos de 2001 a 2019	277
Figura 7 - Déficit Hídrico Climatológico Máximo na Amazônia brasileira entre os anos de 2001 e 2019	288
Figura 8 - Diagrama bioclimático do crescimento da vegetação secundária na região CBA da Amazônia brasileira entre os anos de 2001 e 2019	29
Figura 9 - Diagrama bioclimático do crescimento da vegetação secundária na região EBA da Amazônia brasileira entre os anos de 2001 e 2019	300
Figura 10 - Diagrama bioclimático do crescimento da vegetação secundária na região SBA da Amazônia brasileira entre os anos de 2001 e 2019	311

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A_n	Área do pixel x Fração de área com pelo menos 50% de FS
CBA	Região Central da Amazônia brasileira
CCD	Cold Cloud Duration
CDO	Climate Data Operators
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data
DHC	Déficit Hídrico Climatológico
DHCM	Déficit Hídrico Climatológico Máximo
$DHCM_n$	Déficit Hídrico Climatológico Máximo do pixel
$DHCM_{ponderado}$	Média ponderada do Déficit Hídrico Climatológico Máximo
E	Evapotranspiração real
EBA	Região Leste da Amazônia brasileira
EROS	Earth Resources Observation and Science
ET	Evapotranspiração
ET/LE	Evapotranspiração/Calor Latente
FS	Floresta Secundária
GEE	Google Earth Engine
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas das Nações Unidas
LULC	Land Use and Land Cover
MapBiomas	Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso da Terra
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA DAAC	Distributed Active Archive Center
P	Precipitação
$P_{ponderada}$	Média ponderada da Precipitação
SBA	Região Sul da Amazônia brasileira

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3 METODOLOGIA.....	16
3.1 Área de estudo.....	16
3.2 Base de Dados.....	17
3.2.1 Evapotranspiração.....	17
3.2.2 Precipitação.....	18
3.2.3 Mapeamento de florestas secundárias.....	18
3.3 Diagrama Bioclimático de Malhi <i>et al.</i> , (2009).....	19
3.4 Tratamento dos dados.....	21
3.4.1 Evapotranspiração.....	21
3.4.2 Precipitação.....	21
3.4.3 Floresta Secundária.....	22
3.4.4 Diagrama Bioclimático de Malhi <i>et al.</i> , 2009.....	22
4 RESULTADOS	23
4.1 Crescimento da vegetação secundária na Amazônia brasileira.....	23
4.2 Série histórica de precipitação, evapotranspiração, DHCM.....	25
4.3 Diagrama bioclimático e o crescimento da vegetação secundária.....	28
5 DISCUSSÃO	32
6 CONCLUSÃO.....	35
REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

A resiliência da floresta Amazônica às mudanças climáticas e ao uso da terra tem se tornado cada vez mais importante para a manutenção da biodiversidade e do clima regional, contudo atividades antrópicas estão contribuindo para a diminuição desta resiliência levando a Amazônia para um ponto crítico de desequilíbrio bioclimático da floresta tropical (Boulton *et al.*, 2022).

A floresta Amazônica tem capacidade de regular o clima, especialmente no que diz respeito a temperatura e a precipitação (Leite-Filho *et al.*, 2021; Cohn *et al.*, 2019; Strand *et al.*, 2018), por meio de efeitos biogeofísicos e biogeoquímicos (Borma *et al.*, 2022; Lawrence *et al.*, 2022; Malhi *et al.*, 2021; Costa *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020; Scott *et al.*, 2018; Foley, *et al.*, 2003). A depender de sua intensidade, extensão espacial, frequência, duração e práticas de gestão, o uso da terra tem capacidade para afetar a sucessão florestal, sendo capaz de desempenhar um papel significativo na condução de caminhos sucessionais alternativos em regiões que anteriormente sofreram com atividades antrópicas (Forero-Montaña *et al.*, 2019; Chadazon *et al.*, 2014; Turner *et al.*, 2010). Deste modo, visando compreender as limitações à sucessão e possibilitar a definição de estratégias efetivas de restauração se torna importante o conhecimento acerca da história anterior do uso do solo (Jakovac *et al.*, 2021).

O desmatamento da floresta, para além das consequências na emissão de gases de efeitos estufa, tem capacidade de modificar os padrões de precipitação, com forte relação entre a perda de vegetação natural e redução da estação chuvosa (Commar *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2022; Costa *et al.*, 2019; Leite-Filho *et al.*, 2019; Fu *et al.*, 2013; Butt *et al.*, 2011; Costa e Pires, 2010). Há ainda, como observado nas regiões sul e sudoeste da Amazônia onde ocorre uma significativa redução das chuvas, implicações econômicas para a agricultura, uma vez que essas áreas, são as principais produtoras de soja ou por corresponderem a regiões onde a agricultura apresenta tendência de expansão futura (Leite-Filho *et al.*, 2021).

Por outro lado, após o desmatamento, o uso intensivo da terra e o declínio de sua produtividade agropecuária, áreas abandonadas podem dar origem ao crescimento de vegetação secundária (Elias *et al.*, 2022; Nunes *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020). Cabe ressaltar que a vegetação secundária não está distribuída igualmente ao longo de todo o bioma, mas está concentrada ao longo do arco do desmatamento, dos cursos d'água e dos cursos das principais rodovias (Smith *et al.*, 2020). Atualmente a floresta secundária é a cobertura da terra que mais cresce no bioma, representando cerca de 20% das áreas que antes haviam sido desmatadas na

Amazônia, sendo observado que sua presença diminui a pressão de desmatamento das florestas primárias (Saraiva *et al.*, 2020; Silva-Junior *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020).

O desenvolvimento natural das florestas secundárias vem sendo ameaçado uma vez que o seu desmatamento aumentou ao longo dos anos, dificultando a evolução do processo de regeneração florestal. Isso ocorre, em virtude dos poucos critérios de legislação, uma vez que não existe monitoramento e proteção das regiões de florestas secundárias, impedindo assim que as florestas excedam 10 anos de idade (Heinrich *et al.*, 2021; Schwartz *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2020).

O sexto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas das Nações Unidas (IPCC) alerta que a transição bioclimática da Amazônia já pode estar acontecendo, o que ameaça o potencial de regeneração da região, uma vez que mais de 2 milhões de km² da floresta estariam próximos do ponto de não retorno. Caso a floresta tropical amazônica seja substituída por pastagens irá ocorrer reduções da precipitação, quebra da circulação da monção sul-americana e a floresta passará a ser uma fonte de carbono, intensificando o efeito estufa (IPCC, 2024).

Estima-se que entre 10% e 47% da floresta amazônica esteja exposta a graves ameaças até o ano de 2050. Tais ameaças podem levar a transições no ecossistema, de maneira que ao atingir o ponto de não retorno, a floresta passará por transformações significativas, implicando diretamente na biodiversidade e também na disponibilidade de recursos (Flores *et al.*, 2024).

Por meio da utilização da pesquisa fundamental de Malhi *et al.* 2009, é possível presumir qual será o ponto em que as atividades antrópicas têm potencial para impactar o estado de equilíbrio climático da floresta Amazônica (Pires; Costa, 2013). O regime de chuvas das florestas tropicais é avaliado por meio do emprego de uma estrutura que permite deduzir limites a fim de quantificar a viabilidade florestal. Para tanto, foi construído um diagrama bioclimático que faz uma combinação relacionando os dados regionais de precipitação e os dados do tipo de vegetação local, identificando esses limites climáticos com base na precipitação média anual e no Déficit Hídrico Climatológico Máximo (Malhi *et al.*, 2009).

Embora esteja comprovado que o Brasil pode ter ultrapassado um limite no qual mais desmatamento na Amazônia se traduz em dano econômico direto (Leite-Filho *et al.*, 2021), até o momento, não foi identificado nenhum estudo que tenha realizado a avaliação do potencial de transição bioclimática considerando a regeneração florestal, oriunda do desenvolvimento da floresta secundária.

Dessa forma, esse estudo busca preencher essa lacuna por meio da utilização de dados de alta resolução espacial e temporal para diferentes escalas e uma série histórica abrangente

de posse de metodologias e conjuntos de dados consistentes, tendo em vista a contribuição para o desenvolvimento de políticas de conservação e mitigação dos impactos ao clima.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a evolução bioclimática do crescimento de vegetação secundária na Amazônia brasileira.

2.2 Objetivos Específicos

(i) identificar áreas de crescimento de vegetação secundária na Amazônia durante o período de 2001 a 2019;

(ii) calcular a precipitação total anual, a evapotranspiração e o Déficit Hídrico Climatológico Máximo (DHCM) das áreas com vegetação secundária na Amazônia, para o mesmo período;

(iii) realizar a avaliação temporal do crescimento da floresta secundária na Amazônia baseada no Diagrama Bioclimático de Malhi *et al.*, (2009).

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

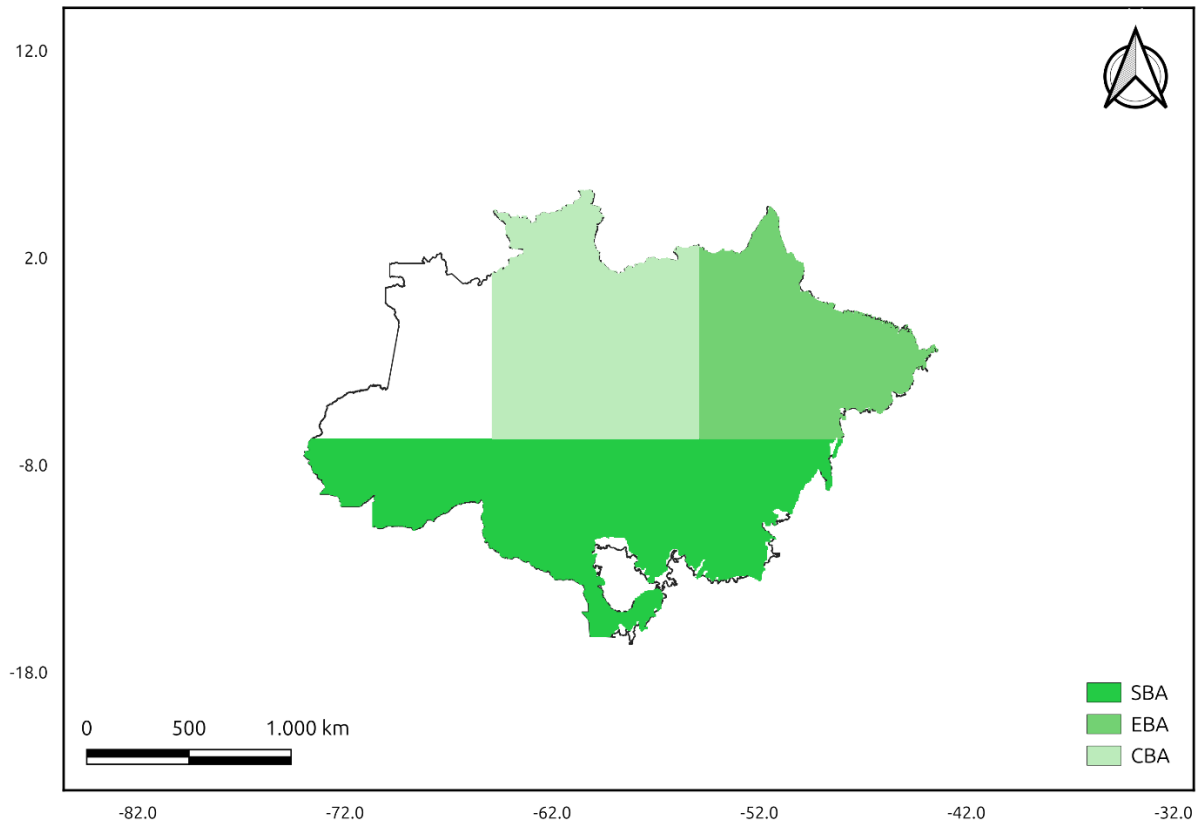
O presente estudo tem como foco a Amazônia brasileira, que ocupa cerca de 49% do território nacional entre os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e parte do Maranhão, do Tocantins e do Mato Grosso. Ela é a maior floresta tropical do mundo, sendo lar de uma enorme quantidade de espécies da flora e da fauna (1,5 milhão de espécies vegetais catalogadas, 3 mil espécies de peixes, 950 tipos de pássaros, e ainda insetos, répteis e mamíferos). A floresta também contém 20% da disponibilidade de água doce do mundo e grandes reservas minerais (IBGE, 2025).

No ano de 2024 foram contabilizados o desmatamento de 6.288 km² de floresta, o que representa uma redução de 30,6% em relação ao ano de 2023, sendo esse o menor índice observado nos últimos nove anos (PRODES, 2024). As respostas climáticas com relação ao desmatamento variam dependendo da taxa e também da região do bioma Amazônico em que ele ocorre, tendo tal atividade a capacidade de provocar mudanças nas características fisiológicas do ecossistema de forma irreversível, como a savanização (Pires e Costa, 2013).

Diante disso, o bioma foi subdividido em três regiões distintas: a região central (CBA), a região leste (EBA) e a região sul (SBA) (Figura 1). Estudos apontam que na região mais interna ou central (CBA), foi observado um equilíbrio bioclimático, não sendo encontradas alterações significativas que indiquem que posteriormente sejam capazes de provocar a transição da cobertura com floresta para uma cobertura de savana (Pires e Costa, 2013). Contudo, nas regiões mais externas (EBA e SBA) foi possível observar uma tendência à sazonalização e savanização bioclimática (Lovejoy e Nobre, 2018; Pires e Costa, 2013).

Por não apresentar crescimento de vegetação secundária, a região oeste do bioma foi desconsiderada. Tomando como base os estudos de Pires e Costa (2013) e Staal *et al.* (2018), foi possível delimitar geograficamente cada região, de forma manual, através do *software* QGIS.

Figura 1 – Divisão da Amazônia brasileira em três regiões distintas, sendo elas a região SBA (Sul), a região EBA (Leste) e a região CBA (Central).



Fonte: Autora

3.2 Base de Dados

3.2.1 Evapotranspiração

Os dados utilizados neste estudo, a fim de estimar os valores de evapotranspiração (ET), correspondem ao conjunto de dados Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) MOD16A2/A3 (ou 6 MOD16A2GF/A3GF) versão 6.1 Evapotranspiração/ Calor Latente (ET/LE), obtidas através dos satélites Terra e Aqua que estão a bordo do MODIS. Os dados em questão, apresentam resolução espacial de 500 m e resolução temporal de 8 dias, tendo início nos anos 2000 gerando informações até o presente. O algoritmo do método é baseado na equação de Penman-Monteith, onde dados diários de reanálise meteorológica e dados da dinâmica das propriedades da vegetação são utilizados como entradas. (Running *et al.*, 2021).

As principais melhorias e alterações presentes na versão C6.1 do produto, quando comparada a versão C6, se referem a abordagens de calibração utilizadas na geração dos produtos Terra (MOD16A2GF) e Aqua (MYD16A2GF) e também na correção da polarização utilizada no reprocessamento que possibilitou o desenvolvimento dessa coleção de dados (Running *et al.*, 2021).

Cabe ressaltar que a extensão temporal é um fator que difere o produto Terra do produto Aqua, uma vez que os dados do primeiro têm início em 2000 indo até o presente e os dados do segundo têm início em 2002 indo até o presente (Running *et al.*, 2021).

3.2.2 Precipitação

O conjunto de dados de precipitação utilizado foi o *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data* (CHIRPS) sendo este, majoritariamente global (variando de 50°S a 50°N e 180°W a 180°E), que teve início em 1981 e que gera dados até o presente (Funk *et al.*, 2015). O CHIRPS foi desenvolvido em colaboração com cientistas do USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) com o objetivo de fornecer os conjuntos de dados completos, confiáveis e atualizados, de modo a gerar um alerta precoce, como análise de tendências e monitoramento de secas sazonais (CHC, 2024).

O método para criação do algoritmo dos dados CHIRPS é dividido em quatro etapas, na primeira etapa, a construção se dá em torno de uma climatologia de 0,05° que incorpora informações de satélite para representar locais com altas taxas de escassez. A segunda parte da criação incorpora estimativas de precipitação diária e mensal de 1981 até o presente com base na CCD de 0,05° (Funk *et al.*, 2015).

A terceira parte combina dados de estação para produzir uma estimativa preliminar com uma latência de cerca de 2 dias e um produto final com uma latência média de cerca de 3 semanas (Funk *et al.*, 2015). Por fim, a quarta parte, usa um novo procedimento de mistura incorporando a estrutura de correlação espacial de estimativas de CCD para atribuir pesos de interpolação (Funk *et al.*, 2015).

Os dados de precipitação do CHIRPS apresentam resolução temporal diária (mm/dia) e resolução espacial de 0,05 graus (aproximadamente 5,5 km). A seleção desse banco de dados se dá ao fato da sua elevada resolução espacial, série histórica abrangente, sendo possível relacioná-los com os dados de vegetação e utilizá-los em todo território brasileiro (Costa *et al.*, 2019).

3.2.3 Mapeamento de florestas secundárias

O banco de dados utilizado neste estudo, tendo em vista o mapeamento das florestas secundárias, é oriundo da coleção 8 do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso da Terra (MapBiomas). Este projeto, lançado em 2015, tem como objetivo revelar as transformações do território brasileiro por meio da ciência, com precisão, agilidade e qualidade, e tornar acessível o conhecimento sobre a cobertura e o uso da terra, para buscar a conservação e o manejo sustentável dos recursos naturais, como forma de combate às mudanças climáticas (Mapbiomas, 2024).

A metodologia da Coleção 8 combina imagens Landsat anuais (1985–2022), processadas em mosaicos temporais no *Google Earth Engine*, com resolução espacial de 30 m. São extraídas métricas espectrais e índices como o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), o *Enhanced Vegetation Index* (EVI) e o *Normalized Difference Fraction Index* (NDFI). A classificação é feita por algoritmos como *random forest* e redes neurais (U-Net), com treinamento específico por bioma. Após isso, aplicam-se correções e filtros espaciais/temporais. A validação usa pontos independentes e métricas de acurácia. A coleção abrange 29 classes de uso e cobertura da terra (Mapbiomas, 2024).

O mapeamento da Floresta Secundária (FS) é realizado por meio de um algoritmo que analisa a trajetória temporal de cada pixel, através da observação da LULC presente em cada célula. Para que o pixel seja classificado como FS é necessário que nos dois anos anteriores ele tenha indicação de uso antrópico e passe a identificar qualquer classe de floresta, isso deve ser observado tanto no ano de interesse como nos próximos (Mapbiomas, 2024).

A coleção 8 do MapBiomas possui 6 classes principais de cobertura e uso do solo identificadas por diferentes ID: Floresta (ID = 1), Formação Natural não Florestal (ID = 10), Agricultura (ID = 14), Área não Vegetada (ID = 22) e Corpo D'água (ID = 26). A Floresta Secundária possui ID = 203. Neste estudo, foi utilizada como FS a subclasse Formação Florestal (ID = 3) da classe 5 Floresta (Mapbiomas, 2024).

3.3 Diagrama Bioclimático de Malhi *et al.*, (2009)

Com base na avaliação da possibilidade de que as mudanças climáticas, tanto regionais quanto globais, possam provocar alterações bioclimáticas em larga escala ou levar à degradação da floresta amazônica, foi utilizada uma estrutura analítica voltada para avaliar o regime de chuvas em florestas tropicais. A partir disso, foi possível definir limites baseados em valores de precipitação que indicam a viabilidade atual da floresta. (Malhi et al., 2009) (Figura 2).

Dessa forma, segundo Malhi *et al.*, 2009, foi possível a criação de limites bioclimáticos, tendo como base a precipitação necessária para que a existência da floresta tropical seja viável, para tanto, foram consideradas medições de precipitação anual e o valor mais negativo do Déficit Hídrico Climatológico Máximo (DHCM). Os seguintes termos, tipologias vegetais, podem ser atribuídos aos limites bioclimáticos: (i) floresta tropical perene: DHCM > -200 mm; (ii) floresta sazonal: DHCM < -200 mm e precipitação > 1500 mm; (iii) savana: DHCM < -300 mm (ponto médio do intervalo de transição amplo, -400 mm < DHCM < -200 mm) e precipitação ≤ 1500 mm (Malhado et al., 2010).

Considera-se que o Déficit Hídrico Climatológico (DHC), calculado a cada mês (n), é a diferença entre a Precipitação (P) e a Evapotranspiração real (E). Dessa forma, é possível afirmar que na época mais úmida do ano, quando a precipitação é superior a evapotranspiração, a vegetação não está sob stress hídrico conferindo que o $DHC = 0$ (Pires e Costa, 2013).

O valor de DHCM é um valor anual obtido através da soma dos valores de DHC (valores mensais) como apresentando a seguir.

Se no mês n $P \geq E$, então

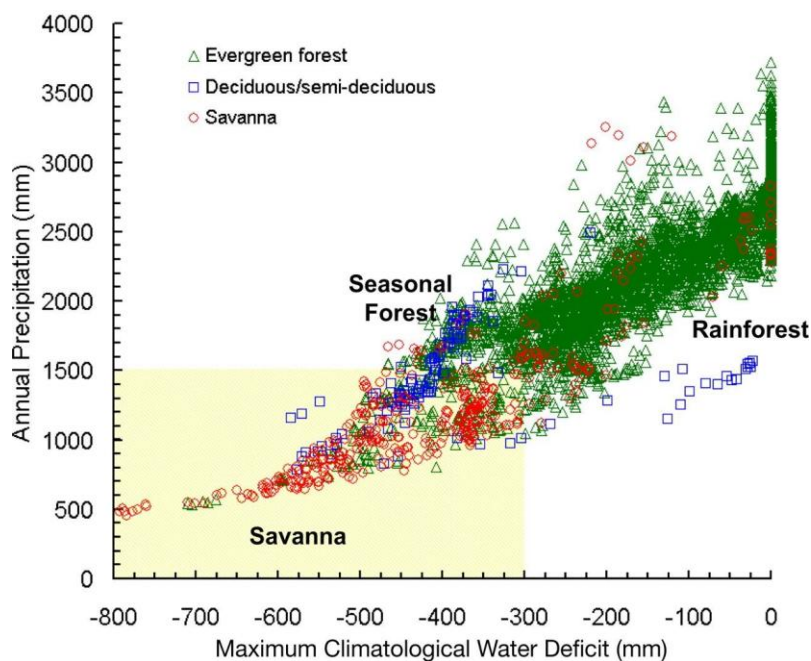
$$DHC_n = 0 \quad (\text{eq. 1})$$

Se no mês n $P < E$, então

$$DHC_n = P_n - E \quad (\text{eq. 2})$$

$$DHCM = \sum_{n=1}^{12} DHC_n \quad (\text{eq.3})$$

Figura 2 - Diagrama Bioclimático Malhi *et al.*, 2009



Fonte: Malhi *et al.* (2009).

3.4 Tratamento dos dados

3.4.1 Evapotranspiração

Neste trabalho, os valores de evapotranspiração são oriundos dos dados disponíveis de ambos os produtos Terra e Aqua. Inicialmente foi feito o recorte dos dados MODIS para a área de interesse de ambos os produtos, e em seguida foi realizada a média entre dois arquivos diferentes do mesmo ano, através do cdo `ensmean`, possibilitando assim a criação de uma nova variável. Os arquivos originais, apresentam resolução espacial de 500 m x 500 m, para que fosse possível relacionar esses dados com os demais, foi necessário alterar sua resolução espacial. Para realizar esse procedimento foi feita uma interpolação conservativa dos dados, através do comando “`cdo remaplaf`” do *Climate Data Operations* (CDO), convertendo sua resolução para 1 km x 1 km.

Os dados referentes ao ano de 2001 seguem a mesma lógica de construção dos demais, a exceção se dá ao fato de que não foi realizada média entre dois arquivos, uma vez que somente o sensor Terra apresenta valores para o ano em questão. O sensor Aqua começou a operar a partir do ano de 2002.

É importante ressaltar que a escolha da resolução de 1 km foi feita com o objetivo de equilibrar o aumento na quantidade de observações dos dados de vegetação com a preservação da integridade dos dados de precipitação. Dessa forma, por meio de análises empíricas, a resolução espacial de 1 km proporcionou esse equilíbrio, sendo possível a sua utilização para reamostragem.

3.4.2 Precipitação

Para que fosse possível a utilização dos dados CHIRPS, inicialmente os mesmos foram recortados para a área de interesse, cabe ressaltar que esses dados apresentam resolução temporal diária. De posse dos dados manipulados, foi possível realizar o cálculo da média mensal, através do cdo `monmean`, sendo possível criar uma nova variável possuindo 12 times (um time para cada mês). Ainda de posse do dado bruto, recém cortado para a região da Amazônia brasileira, também foi possível calcular a média anual para cada um dos arquivos compreendidos entre os anos de 2001 e 2019.

Os arquivos originais, apresentam resolução espacial de 5 km x 5 km, para que fosse possível relacionar esses dados com os demais, foi necessário alterar sua resolução espacial. Para realizar esse procedimento foi feita uma interpolação conservativa dos dados, através do comando “cdo remaplaf” do CDO, convertendo-os para dados de 1 km x 1km.

3.4.3 Floresta Secundária

Para que fosse possível utilizar os dados de vegetação em conjunto com os demais (dados de evapotranspiração e dados de precipitação) foi necessário modificar a resolução dos mesmos. Os dados brutos apresentam resolução espacial de 30 m, sendo necessário reamostrar a sua resolução para 1 km.

Para a reamostragem dos dados de vegetação, foram alocados, aproximadamente, 1112 pixels de 30 m dentro de cada pixel de 1 km. O primeiro passo foi criar mapas binários, onde o valor 1 foi atribuído aos pixels que contém o ID da categoria de interesse (203 - FS) dos dados do Método do Desmatamento e o valor 0 foi atribuído aos pixels das demais classes. De posse dos mapas binários, o segundo passo consistiu na realização da reamostragem utilizando um método de redução de resolução (*reduceResolution*) implementado no *Google Earth Engine* (GEE), de modo que os pixels menores fossem agregados em pixels maiores. Visando a obtenção da fração de área ocupada pela classe de interesse dentro do pixel de 1 km, a média aritmética foi utilizada como redutor.

Todos os procedimentos descritos foram realizados no GEE.

3.4.4 Diagrama Bioclimático de Malhi *et al.*, 2009

Neste trabalho foi realizada uma adaptação do Diagrama Bioclimático de Malhi *et al.*, 2009, a fim de relacionar o regime de precipitação, o DHCM e o crescimento da vegetação secundária na Amazônia brasileira para o período de 2001 a 2019. As análises foram feitas separadas para cada uma das três regiões, desse modo cada uma tem um diagrama próprio.

De posse dos dados foi calculada a média aritmética dos valores de precipitação e dos valores de DHCM para cada um dos anos, o primeiro resultado obtido diz respeito aos valores do eixo *Y* e o segundo resultado aos valores do eixo *X*. Cabe ressaltar que o par ordenado para obter os valores da média ponderada levou em consideração a área total do pixel multiplicada pela área do pixel com pelo menos 50% de vegetação secundária, como demonstrado abaixo.

Valor do eixo Y para cada ano:

$$P_{ponderada} = \frac{\sum(Ai \times Pi)}{\sum Ai} \quad (\text{eq.4})$$

Onde,

- $P_{ponderada}$ = Média ponderada da precipitação;
- Ai = Área do pixel x Fração de área com pelo menos 50% de FS;
- Pi = Precipitação total do pixel.

Valor do eixo X para cada ano:

$$DHCM_{ponderado} = \frac{\sum(Ai \times DHCMi)}{\sum Ai} \quad (\text{eq.5})$$

Onde,

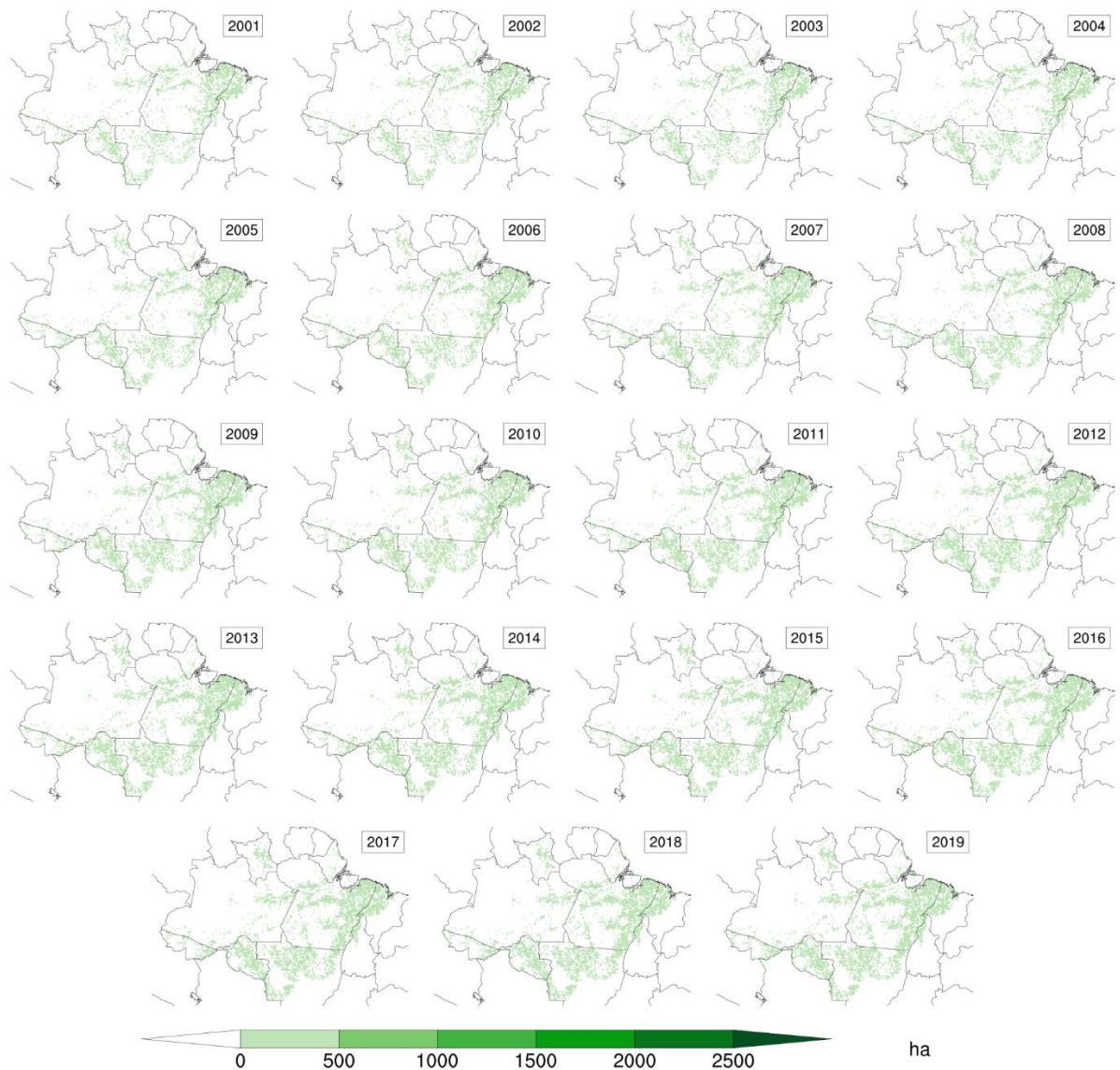
- $DHCM_{ponderado}$ = Média ponderada do Déficit Hídrico Climatológico Máximo;
- Ai = Área do pixel x Fração de área com pelo menos 50% de FS;
- $DHCMi$ = Déficit Hídrico Climatológico Máximo do pixel.

4 RESULTADOS

4.1 Crescimento da vegetação secundária na Amazônia brasileira

A análise da série histórica dos dados sobre a presença de vegetação secundária revelou uma menor cobertura no ano inicial (2001) e uma expansão contínua da vegetação ao longo dos anos subsequentes. No ano de 2001 foram contabilizados 43914 x 10⁶ ha com a presença de pelo menos 50% de vegetação secundária, em 2019 houve um aumento aproximadamente 1957%, uma vez que 903173 x 10⁶ ha de vegetação foram quantificados. Observou-se também que o crescimento territorial da vegetação secundária foi mais expressivo nas regiões EBA e CBA, especialmente ao longo do rio Amazonas (Figura 3).

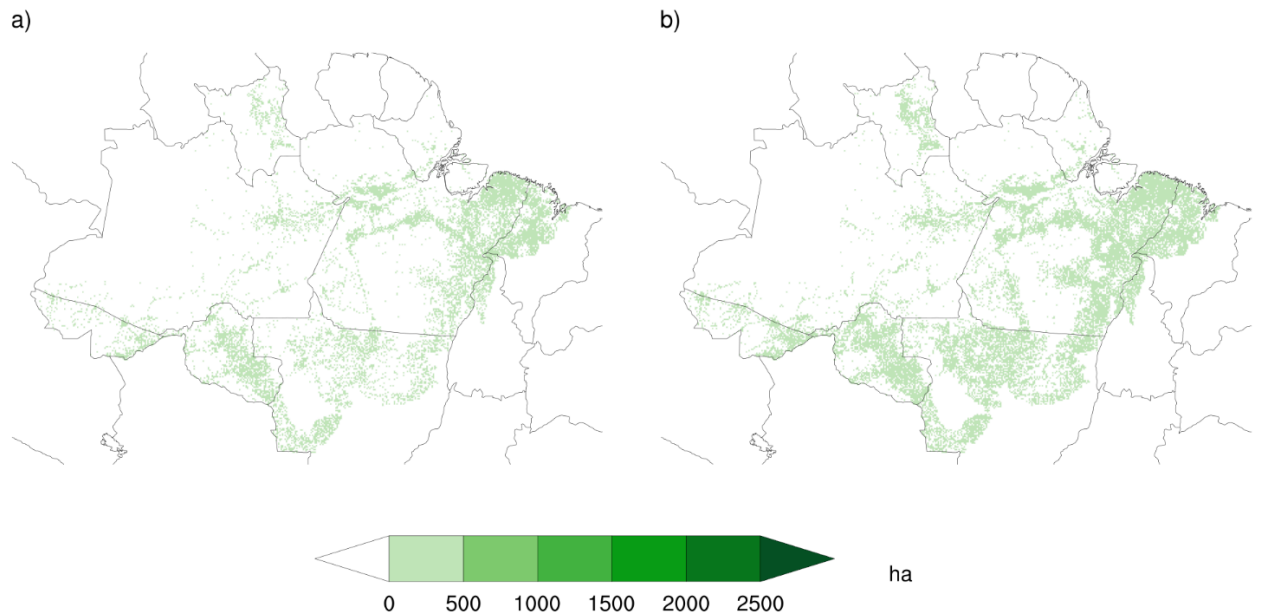
Figura 3 - Crescimento da vegetação secundária na Amazônia brasileira entre os anos de 2001 e 2019.



Fonte: Autora.

Na região EBA, o aumento da vegetação secundária foi acentuado, particularmente no leste do estado do Pará e no oeste do estado do Maranhão (Figura 4a). De forma semelhante, a região CBA apresentou um crescimento significativo da cobertura vegetal ao longo do rio Amazonas, reforçando sua importância para a regeneração florestal. Por outro lado, na região sul do bioma, que abrange o norte do estado do Mato Grosso e o sul dos estados do Amazonas e do Pará, o crescimento da vegetação secundária foi mais discreto e pouco expressivo (Figura 4b).

Figura 4 - Comparativo entre as áreas de vegetação secundária, em hectares, na Amazônia nos anos de 2001 (a) e 2019 (b).

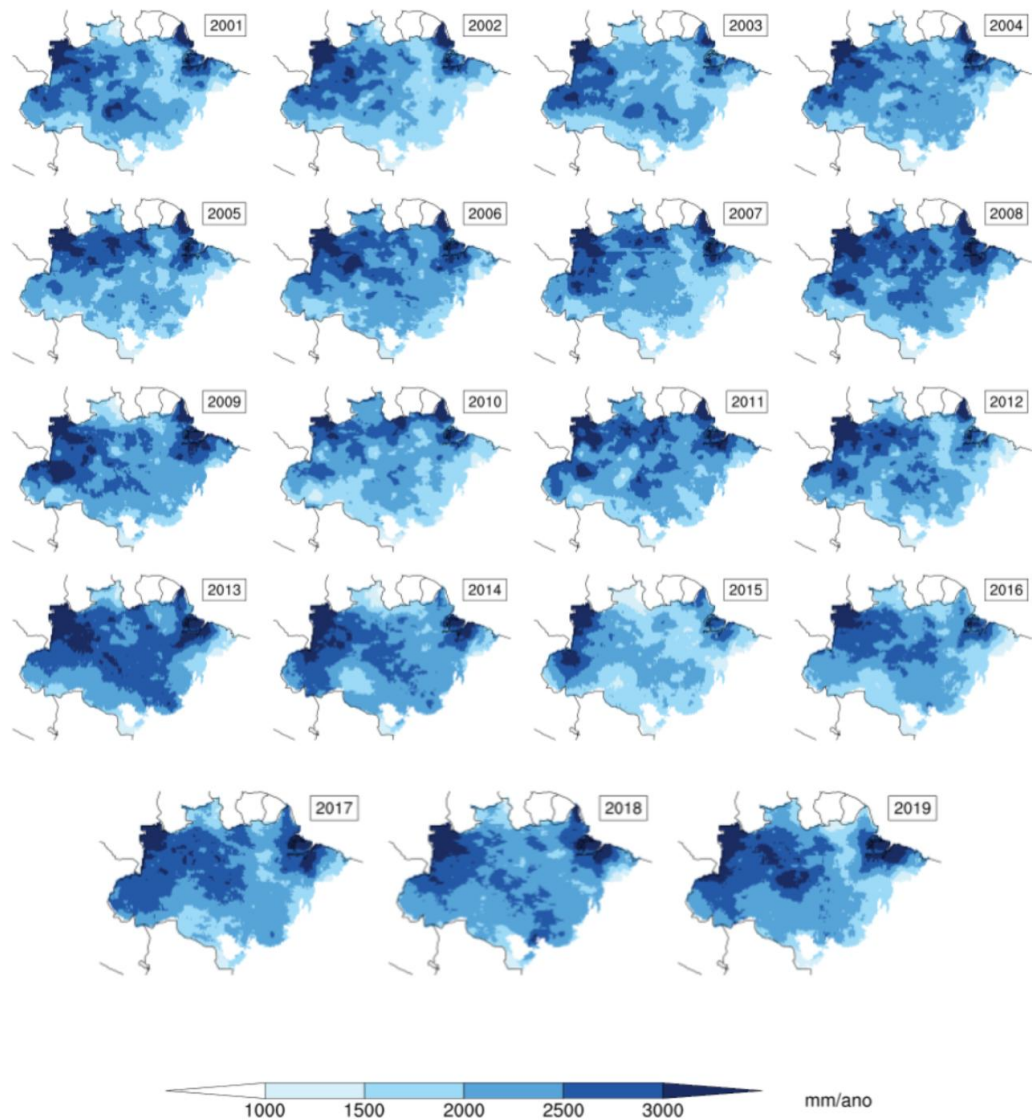


Fonte: Autora.

4.2 Série histórica de precipitação, evapotranspiração, DHCM

Ao quantificar a precipitação total anual para a Amazônia brasileira, durante o período de 2001 a 2019, foi possível observar a variabilidade interanual das chuvas, onde as menores taxas de precipitação estão concentradas ao longo das regiões SBA e EBA, regiões características do arco do desmatamento, e as maiores taxas de precipitação estão presentes na região CBA (Figura 5). A exceção ocorre nos anos de 2002-2003, 2009-2010 e 2015-2016 que são anos mais secos e com poucas chuvas, devido aos eventos do El Niño.

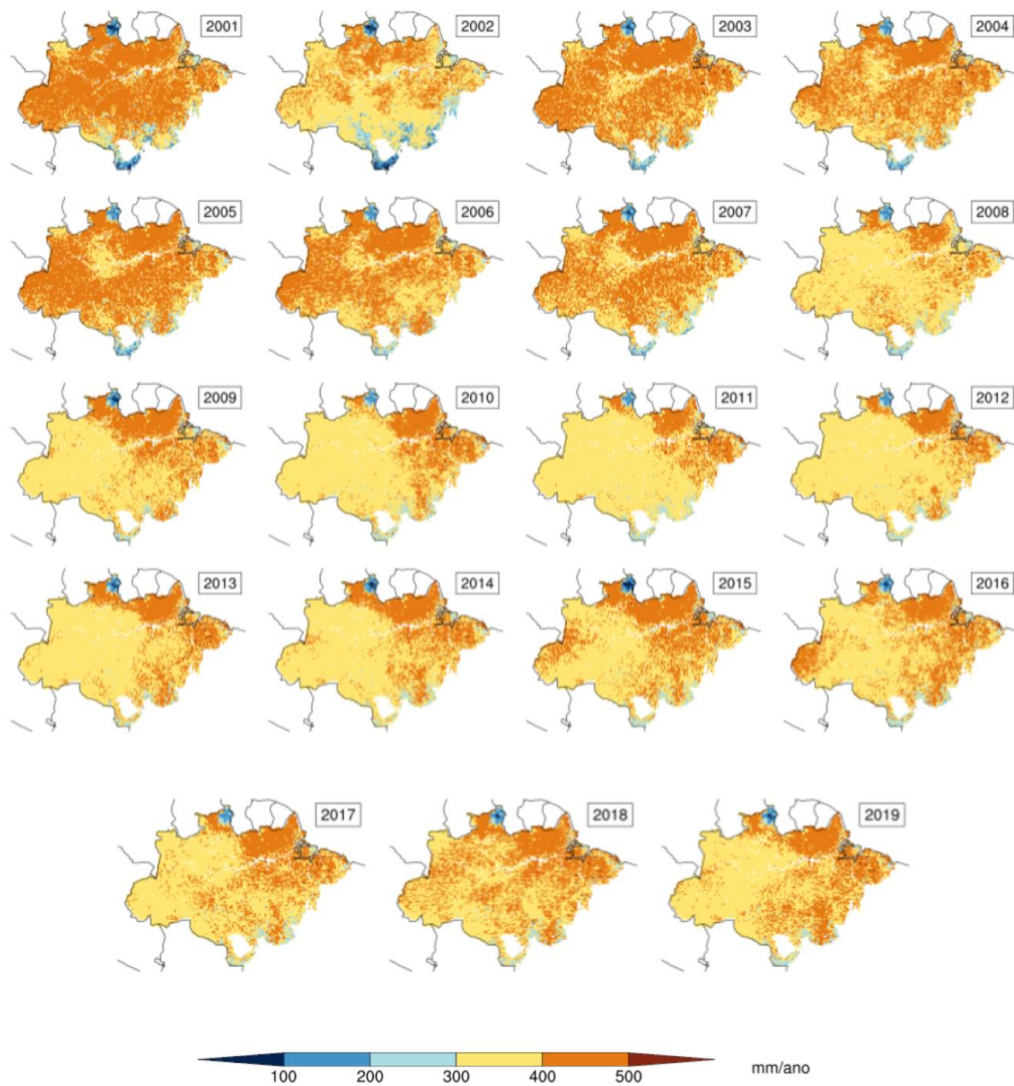
Figura 5 - Precipitação total anual na Amazônia brasileira entre os anos de 2001 e 2019



Fonte: Autora.

De posse dos dados MODIS foi possível calcular a evapotranspiração total anual para a Amazônia brasileira, durante o período de 2001 a 2019. Nos anos iniciais das análises observam-se altas taxas de evapotranspiração distribuídas de maneira uniforme ao longo do bioma. A partir do ano de 2008 as taxas mais elevadas de evapotranspiração são observadas na região EBA e a partir de 2016 esse aumento também se faz expressivo na região SBA do bioma (Figura 6).

Figura 6 - Evapotranspiração total anual na Amazônia brasileira entre os anos de 2001 a 2019



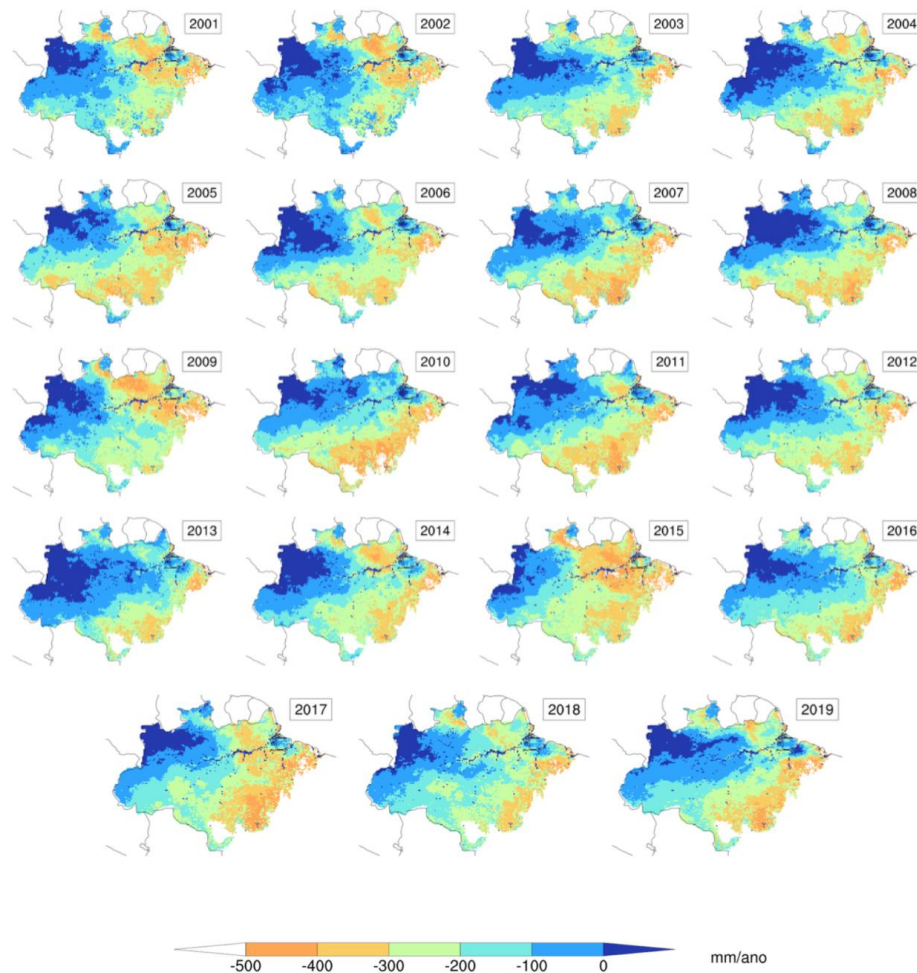
Fonte: Autora.

Por meio dos valores obtidos do Cálculo do DHCM para a Amazônia brasileira, durante o período de 2001 a 2019, foi possível observar que nas partes em tons de azul dos mapas o volume de chuvas é maior e consequentemente os valores de DHCM são menos negativos, já nas partes em tons de laranja os volumes de chuvas são menores e os valores de DHCM são mais negativos (Figura 7).

Os valores mais negativos do DHCM, estão concentrados ao longo da região SBA do bioma, onde o uso dos solos é predominantemente de uso agrícola, e também na região EBA. Os valores menos negativos de DHCM estão presentes na região CBA (Figura 7).

Seguindo o que acontece com o regime das chuvas na região, os valores mais intensos de DHCM são acentuados nos anos de 2002-2003, 2009-2010 e 2015-2016 que foram anos mais secos e com pouca chuva, devido aos eventos do El Niño.

Figura 7 - Déficit Hídrico Climatológico Máximo na Amazônia brasileira entre os anos de 2001 e 2019



Fonte: Autora.

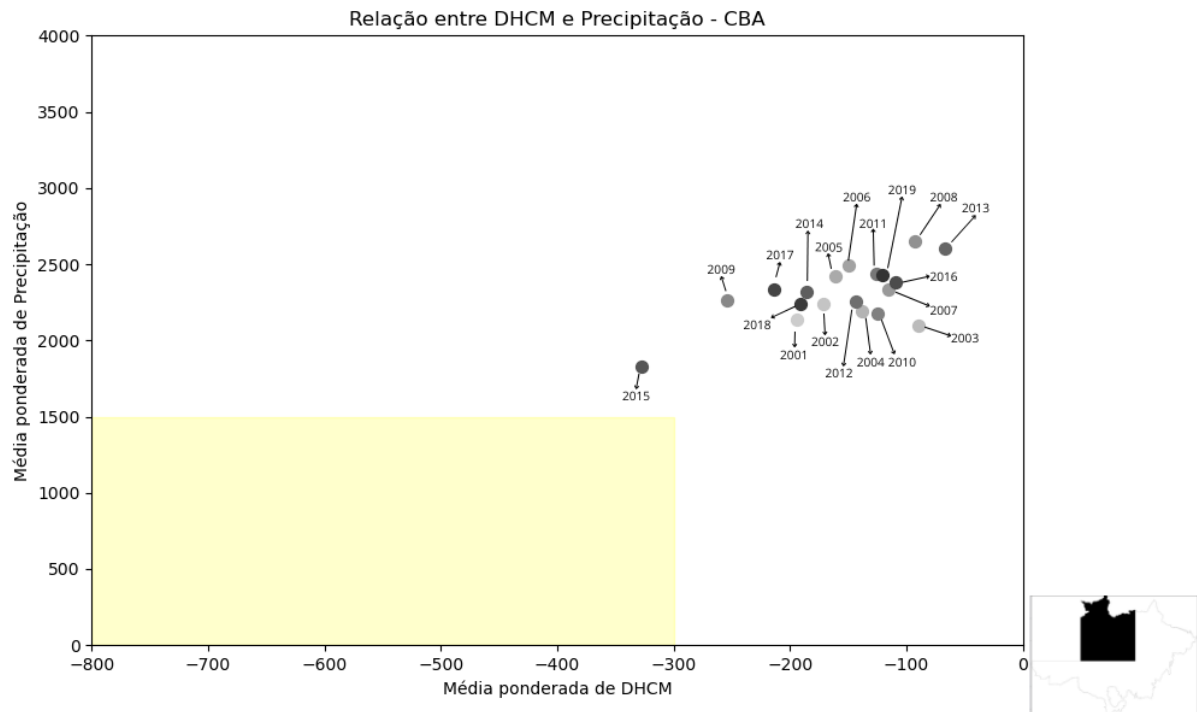
4.3 Diagrama bioclimático e o crescimento da vegetação secundária

Os pontos no diagrama representam o crescimento da vegetação secundária para cada um dos anos compreendidos entre 2001 e 2019. A parte amarela do gráfico diz respeito ao intervalo de crescimento da vegetação em condições desfavoráveis para o desenvolvimento das florestas tropicais, uma vez que o ambiente é caracterizado pelo clima de savana.

Na região CBA, foi possível observar o afastamento dos pontos do envelope característico de savana, à exceção do ano de 2015 (característico de um forte El Niño). Ao que

tudo indica é provável que o crescimento da vegetação consiga desenvolver um bom papel na manutenção do equilíbrio bioclimático uma vez que tem influência positiva tanto nas taxas de precipitação quanto nas taxas do DHCM (Figura 8).

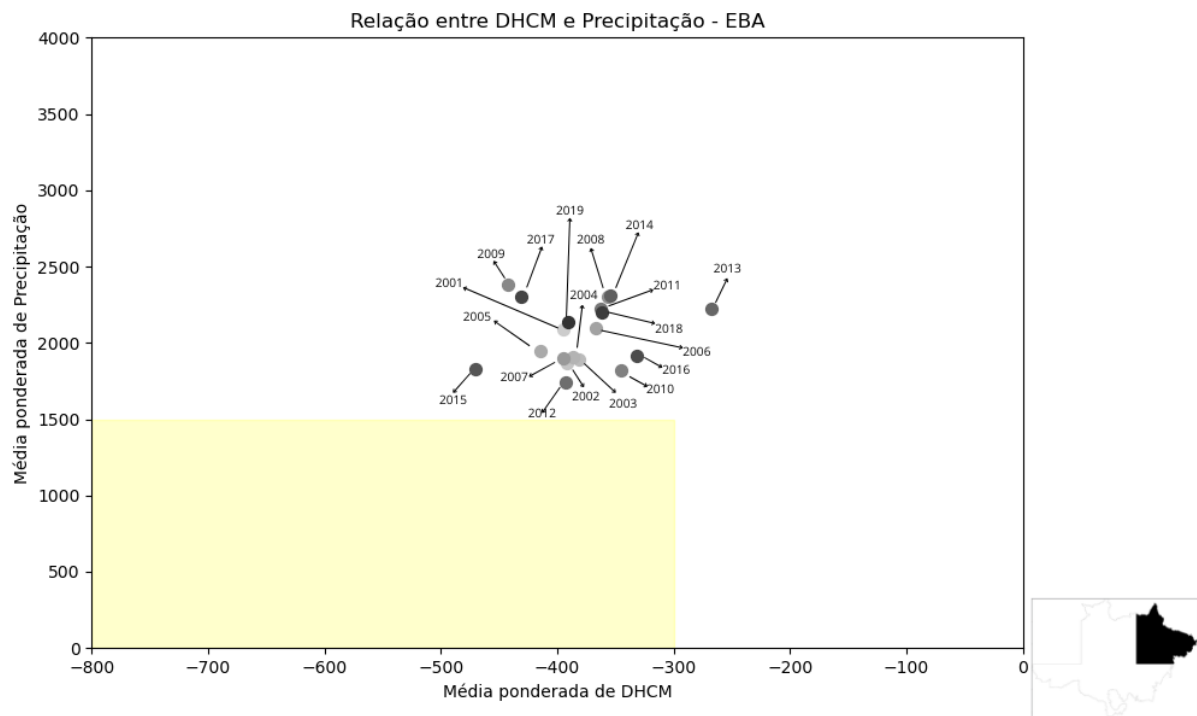
Figura 8 - Diagrama bioclimático do crescimento da vegetação secundária na região CBA da Amazônia brasileira entre os anos de 2001 e 2019



Fonte: Autora.

Na região EBA, foi possível observar a aproximação dos pontos do envelope característico de savana. É possível que o crescimento da vegetação consegue impactar de forma positiva nas taxas de precipitação, sendo observado seu aumento ao longo dos anos, contudo os impactos nos valores do DHCM não são significativos, uma vez que eles continuam apresentando valores muito negativos. Dessa forma é provável que mesmo com o crescimento da vegetação secundária a região EBA corra o risco de sofrer uma transição climática (Figura 9).

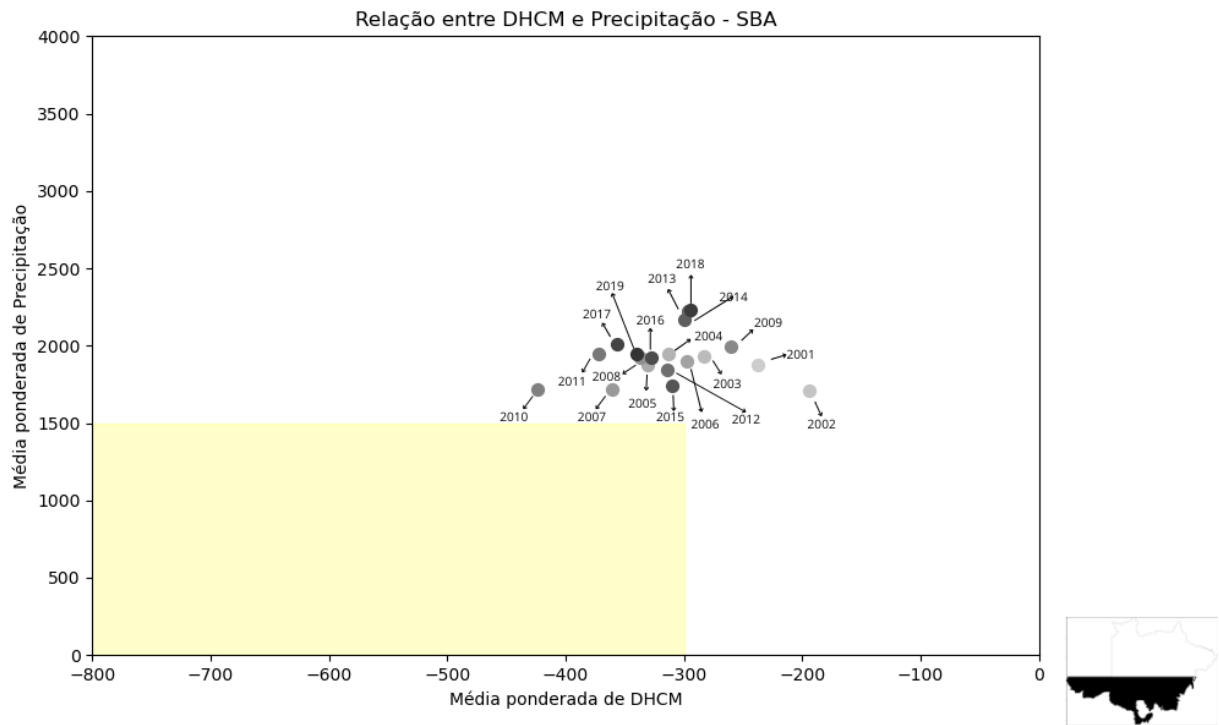
Figura 9 - Diagrama bioclimático do crescimento da vegetação secundária na região EBA da Amazônia brasileira entre os anos de 2001 e 2019



Fonte: Autora.

Na região SBA, observa-se a aproximação dos pontos para o envelope característico de savana, no intervalo de anos analisados. Quando comparado ao uso agrícola, o crescimento da vegetação secundária é benéfico para a região, contudo é possível que a presença da mesma não mitigue o risco da transição bioclimática da floresta. Isso se dá, uma vez que não é observada uma variação no aumento das taxas de precipitação ao longo dos anos, mas é possível observar que os valores do DHCM tendem a ser muito negativos (Figura 10).

Figura 10 - Diagrama bioclimático do crescimento da vegetação secundária na região SBA da Amazônia brasileira entre os anos de 2001 e 2019



Fonte: Autora.

5 DISCUSSÃO

Ao longo dos anos o desmatamento da floresta amazônica tem impactado de forma significativa no clima regional e global, tanto pelo aumento das temperaturas, pela redução da estação chuvosa e como observado pela emissão de gás carbônico para a atmosfera (Shukla *et al.*, 1990; Gatti *et al.*, 2021; Nobre *et al.*, 2016; Staal *et al.*, 2020; Butt, 2023).

É observado que nas regiões desmatadas e abandonadas do bioma, anteriormente ocupadas pela vegetação primária, ocorre o crescimento da vegetação secundária. Estudos apontam que o crescimento mais acentuado se dá principalmente nas regiões onde a colonização agrícola não obteve sucesso (Martin, 2024). Dentre as três regiões analisadas neste estudo e tomando como base a Figura 3 é possível observar que ao longo dos anos, o crescimento da vegetação secundária é mais expressivo na região EBA da Amazônia brasileira, seguido da região SBA. A região CBA apresenta as menores taxas de crescimento da vegetação.

O aumento da agricultura e da exploração madeireira na região EBA vêm sendo observados, e como consequência tem-se maiores taxas de emissão de carbono e na fragmentação florestal (Gatti *et al.*, 2021; Silva Junior *et al.*, 2022). Os estados do Pará e Mato Grosso, pertencentes a região SBA, apresentam grandes áreas de vegetação secundária em regeneração, contudo ela é limitada pela presença característica do arco do desmatamento impedindo o avanço da floresta (Martin, 2024).

Através da figura 5 é possível observar que as maiores taxas de precipitação ocorrem na região CBA, enquanto as menores ocorrem na região SBA e na região EBA do bioma, sendo ambas regiões próximas ao arco do desmatamento. Estudos apontam a frequência de dias secos e uma diminuição nas taxas de precipitação na Amazônia Oriental, esta por sua vez abrange parte da região EBA e parte da região SBA (Marengo *et al.*, 2022). Na região SBA é possível observar como as taxas de desmatamento influenciam de forma significativa na redução nas taxas de precipitação e maiores períodos de seca (Leite Filho *et al.*, 2021; Staal *et al.*, 2020).

Nos anos de ocorrência de El Niño é possível observar uma diminuição nas taxas de precipitação ao longo de todo o bioma. Esses eventos, são caracterizados pelo aquecimento da superfície do Oceano Pacífico tropical e também pelo enfraquecimento dos ventos alísios equatoriais. Tais condições são acompanhadas por mudanças na circulação atmosférica e oceânica, afetando o clima global, os ecossistemas marinhos e terrestres, a pesca e as atividades humanas (Timmermann, 2018).

Na Amazônia, o El Niño também tem capacidade de aumentar as anomalias de temperatura, o que combinado com a diminuição da precipitação, é capaz de afetar a

produtividade do ecossistema e o sequestro de carbono da região (Wenhong Li *et al.*, 2011). Quando comparado aos eventos de El Niño de 1982/1983 e o de 1997/1998, o evento que ocorreu no ano de 2015/2016 apresentou a maior seca já vista na Amazônia (Jiménes-Munõz *et al.*, 2016). Vale destacar, o aumento nos números de incêndios florestais na Amazônia brasileira devido a ocorrência do El Niño (Vilanova *et al.*, 2021; Fonseca *et al.*, 2017)

Estudos indicam que as taxas de evapotranspiração da vegetação secundária podem ser até 20% superiores às da vegetação primária. Essa diferença é atribuída ao rápido crescimento e à alta densidade de biomassa das florestas em regeneração, fatores que intensificam a transpiração e a liberação de vapor d'água na atmosfera. Essa maior evapotranspiração contribui significativamente para a reciclagem de umidade na Amazônia, influenciando positivamente a formação de nuvens e os padrões de precipitação (Randow *et al.*, 2020). Segundo Baker *et al.*, 2021 as taxas de evapotranspiração na Amazônia seguem uma tendência de leste a oeste/sul. Na Amazônia meridional (compreende a região SBA e a região EBA) é possível observar que a mudança de uso e cobertura do solo afeta de forma negativa os valores de evapotranspiração (Oliveira *et al.*, 2021).

Conforme esperado, em épocas com menores taxas de precipitação é observado valores de DHCM mais negativos (Figura 7). Quando comparada às demais regiões do bioma, observa-se que a região SBA apresenta os valores mais negativos de DHCM, isso se dá em decorrência das mudanças de uso e cobertura do solo, uma vez que as florestas vêm dando espaço a práticas agrícolas (Leite Filho *et al.*, 2021; Lopes *et al.*, 2021; Chaudhari *et al.*, 2019;)

Na região EBA, onde é observado aumento da agricultura e da exploração madeireira, também é possível observar valores mais negativos de DHCM. Um estudo realizou a modelagem climática para a região sendo observado indicativos de tendências para condições mais secas, onde ocorre redução do fluxo dos rios durante a estação seca, o que por sua vez pode contribuir de forma negativa para o déficit hídrico na região (Sorribas *et al.*, 2016). A região CBA apresenta os valores menos negativos de DHCM, o que se dá principalmente ao fato de que a bacia do Rio Amazonas que está ficando mais úmida, contudo, suas sub-bacias no sul e sudeste sofrem perdas significativas no armazenamento de água em decorrência da mudança de uso do solo (Chaudhari *et al.*, 2019).

A criação do diagrama bioclimático é possível quando o crescimento da vegetação é relacionado com o regime de precipitação e com o DHCM. Na região CBA, é provável que o crescimento da vegetação secundária desempenhe um papel significativo no regime de chuvas e na diminuição dos valores DHCM, sendo muito importante a presença da vegetação

secundária para garantir que o equilíbrio bioclimático seja mantido na região. A exceção se dá ao ano de 2015, onde é registrada a ocorrência de um forte El Niño (Figura 8).

Na região EBA, onde as taxas de desmatamento e a extração madeireira são expressivas, observa-se um acentuado crescimento da vegetação secundária. Contudo, por mais importante que seja o desenvolvimento da floresta, é provável que ela não consiga garantir que a região não sofra uma transição bioclimática. Isso ocorre, pois, mesmo impactando de forma positiva no regime de chuvas, não é observado a ocorrência do mesmo aos valores de DHCM que se mantém muito negativos (Figura 9).

É provável que na região SBA, o crescimento da vegetação secundária, por mais importante que seja, principalmente quando comparado ao uso agrícola do solo, não seja capaz de garantir que o risco da transição bioclimática da floresta seja mitigado. Isso se dá uma vez que não ocorre aumento nas taxas de precipitação e também não afeta positivamente os valores de DHCM que se mantém muito negativos (Figura 10). A vegetação tende a crescer em condições que não são favoráveis para o seu desenvolvimento uma vez que se aproxima do envelope característico de savana. Essa região é marcada pela presença do denominado arco do desmatamento e pela intensa ocorrência de práticas agrícolas (Leite Filho *et al.*, 2021).

6 CONCLUSÃO

Ao longo dos anos analisados (2001 a 2019) foi possível observar um aumento significativo da vegetação secundária na Amazônia brasileira. A região com maiores taxas de crescimento foi a região EBA, seguido pela região SBA, onde a presença da vegetação também se dá de maneira expressiva. Na região CBA é possível observar a presença da vegetação secundária, principalmente nas margens do Rio Amazonas, mas com menor intensidade quando comparada às demais regiões.

As maiores taxas de precipitação total anual são observadas ao longo da região CBA, as menores taxas na região EBA e principalmente na região SBA. Os valores do Déficit Hídrico Climatológico Máximo seguem o padrão inverso, nas regiões onde as taxas de precipitação são maiores (região CBA) o DHCM apresenta valores menos negativos. Já nas regiões onde as taxas de precipitação são menores (região EBA e região SBA) o DHCM apresenta valores mais negativos. Essa característica é intensificada em anos de EL Niño, como exemplo o ano de 2015 onde as taxas de precipitação são menores em todo o bioma e os valores de DHCM são mais negativos.

É provável que o crescimento da vegetação secundária na região CBA atue de forma positiva para manutenção do clima no desenvolvimento das florestas tropicais, onde é observado um aumento nas taxas de precipitação e valores menos negativos de DHCM, afastando a região do envelope característico de savana. Na região EBA observa-se que mesmo tendo capacidade de afetar positivamente nas taxas de precipitação é possível que o crescimento da vegetação não consiga contribuir em valores menos negativos de DHCM, assim a floresta pode migrar para o clima característico de savana. É provável que na região SBA o crescimento da vegetação, por mais importante que seja, não mitigue a possibilidade da ocorrência de uma transição climática, uma vez que ela não contribui aumentando as taxas de precipitação e apresenta valores menos negativos de DHCM, aqui a vegetação cresce muito próxima do envelope climático característico do desenvolvimento de savana. Mesmo com a regeneração florestal, partes importantes do bioma ainda estão em risco de passarem pela transição climática

REFERÊNCIAS

- Baker, J. C. A. *et al.* Evapotranspiration in the Amazon: spatial patterns, seasonality, and recent trends in observations, reanalysis, and climate models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, n. 4, p. 2279-2300, 2021. <https://hess.copernicus.org/articles/25/2279/2021/>
- Borma, L. S, Costa, M. H., da Rocha, H. R., Arieira, J., Nascimento, N. C. C., Jaramillo-Giraldo, C., Ambrosio, G., Carneiro, R. G., Venzon M., Neto, A. F., van der Hoff, R., Oliveira, B. F. A., Rajão, R., Nobre, C. A. Beyond carbon: The contributions of south American tropical humid and subhumid forests to ecosystem services. **Reviews of geophysics**, v. 60, n. 4, 2022.
- Boulton, C. A.; Lenton, T. M.; Boers, N. Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. **Nature Climate Change**, v. 12, n. 3, p. 271-278, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01287-8>
- Butt, E. W. *et al.* Amazon deforestation causes strong regional warming. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 120, n. 45, p. e2309123120, 2023. <https://doi.org/10.1073/pnas.2309123120>
- Butt, N.; Oliveira, P., A.; Costa, M., H. Evidence that deforestation affects the onset of the rainy season in Rondonia, Brazil. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 116, n. D11, 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JD015174>
- Chaudhari, S. *et al.* Multi-decadal hydrologic change and variability in the Amazon River basin: understanding terrestrial water storage variations and drought characteristics. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 7, p. 2841-2862, 2019. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2841-2019>
- CHC – **Climate Hazards Center**. Disponível em: <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>. Acesso: Dez. 2024.
- Cohn, A.; Bhattarai, N.; Camolo, J.; Crompton, O.; Dralle, D.; Duncan, J.; Thompson, S. Forest loss in Brazil increases maximum temperatures within 50 km. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 8, p. 084047, 2019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab31fb>
- Commar, L., F., S.; Abrahão, G., M.; Costa, M., H. A possible deforestation-induced synoptic-scale circulation that delays the rainy season onset in Amazonia. **Environmental Research Letters**, v. 18, n. 4, p. 044041, 2023. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/acc95f>
- Costa, M. H.; Borma, L. S.; Brando, P. M. Chapter 7: Biogeophysical Cycles: Water Recycling, Climate Regulation. Nobre, C. A. *et al.* (eds.). Science Panel for the Amazon **Amazon Assessment Report 2021 – Part I**, 2021. Disponível em: <https://www.theamazonwewant.org/wp-content/uploads/2022/05/Chapter-7-Bound-May-9.pdf>. Acesso em: Dez. 2024.

- Costa, M. H.; Fleck, L. C.; Cohn, A. S.; Abrahão, G. M.; Brando, P.; Coe, M. T.; Fu, R.; Lawrence, D.; Pires, G. F.; Pousa, R.; Soares-Filho, B. Climate risks to Amazon agriculture suggest a rationale to conserve local ecosystems. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 17, n. 10, p. 584-590, 2019. <https://doi.org/10.1002/fee.2124>
- Costa, M., H.; Pires, G., F. Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. **International Journal of Climatology**, v. 30, n. 13, p. 1970-1979, 2010. <https://doi.org/10.1002/joc.2048>
- Elias, F.; Ferreira, J.; Resende, A. F.; Berenguer, E.; França, F.; Smith, C. C.; Schwartz, G.; Nascimento, R. O.; Guedes, M.; Rossi, L. C.; Seixas, M. M. M.; Silva, C. M.; Barlow, J. Comparing contemporary and lifetime rates of carbon accumulation from secondary forests in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 508, p. 120053, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120053>
- Flores, B. M.; Montoya, E.; Sakschewski, B.; Nascimento, N.; Staal, A.; Betts, R. A.; ... ; Hirota, M. Critical transitions in the Amazon forest system. **Nature**, v. 626, n. 7999, p. 555-564, 2024. <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06970-0>
- Foley, J. A., Costa, M. H., Delire, C., Ramankutty, N.; Snyder, P. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 1, n. 1, p. 38-44, 2003. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2003\)001\[0038:GSHTEC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0038:GSHTEC]2.0.CO;2)
- Fonseca, M. G.; Anderson, L. O.; Arai, E.; Shimabukuro, Y. E.; Xaud, H. A.; Xaud, M. R.; ...; Aragão, L. E. Climatic and anthropogenic drivers of northern Amazon fires during the 2015–2016 El Niño event. **Ecological applications**, v. 27, n. 8, p. 2514-2527, 2017. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtq039>
- Forero-Montaña, J.; Marcano-Vega, H.; Zimmerman, J., K.; Brandeis, T., J. Potential of second-growth Neotropical forests for forestry: the example of Puerto Rico. **Forests, Trees and Livelihoods**, v. 28, n. 2, p. 126-141, 2019. <https://doi.org/10.1080/14728028.2019.1579673>
- Fu, R.; Yin, L.; Li, W.; Arias, P., A.; Dickinson, R., E.; Huang, L.; Chakraborty, S.; Fernandes, K.; Liebmann, B.; Fishere, R.; Myneni, R., B. Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 45, p. 18110-18115, 2013. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302584110>
- Funk, C.; Peterson, P.; Landsfeld, M.; Pedreros, D.; Verdin, J.; Shukla, S.; Husak, G.; Rowland, J.; Harrison, L.; Hoell, A.; Michaelsen, J. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific data**, v. 2, n. 1, p. 1-21, 2015. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gatti, L. V.; Basso, L. S.; Miller, J. B.; Gloor, M.; Gatti Domingues, L.; Cassol, H. L.; ...; Neves, R. A. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, v. 595, n. 7867, p. 388-393, 2021. <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03629-6>

Heinrich, V. H.; Dalagnol, R.; Cassol, H. L.; Rosan, T. M.; de Almeida, C. T.; Silva Junior, C. H.; ...; Aragão, L. E. Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. **Nature communications**, v. 12, n. 1, p. 1785, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22050-1>

IPCC - **IPCC Sixth Assessment Report**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>. Acesso em: Dez, 2024.

Jakovac, C., C.; Junqueira, A., B.; Crouzeilles, R.; Peña-Claros, M.; Mesquita, R., C., G.; Bongers, F. The role of land-use history in driving successional pathways and its implications for the restoration of tropical forests. **Biological Reviews**, v. 96, n. 4, p. 1114-1134, 2021. <https://doi.org/10.1111/brv.12694>

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. 1, p. 33130, 2016. <https://www.nature.com/articles/srep33130>

Lawrence, D.; Coe, M.; Walker, W.; Verchot, L.; Vandecar, K. The unseen effects of deforestation: biophysical effects on climate. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 5, p. 756115, 2022. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.756115>

Leite-Filho, A.; Soares-Filho, B.; Davis, J.; Abrahão, G.; Börner, J. Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 2591, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22840-7>.

Li, W.; Zhang, P.; Ye, J.; Li, L.; Baker, P. A. Impact of two different types of El Niño events on the Amazon climate and ecosystem productivity. **Journal of Plant Ecology**, v. 4, n. 1-2, p. 91-99, 2011. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtq039>

Lopes, T. R.; Zolin, C. A.; Mingoti, R.; Vendrusculo, L. G.; de Almeida, F. T.; de Souza, A. P.; ...; Uliana, E. M. Hydrological regime, water availability and land use/land cover change impact on the water balance in a large agriculture basin in the Southern Brazilian Amazon. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 108, p. 103224, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103224>

Malhado, A. C. M.; Pires, G. F.; Costa, M. H. Cerrado conservation is essential to protect the Amazon rainforest. **Ambio**, v. 39, p. 580-584, 2010. <https://doi.org/10.1007/s13280-010-0084-6>.

Malhi, Y.; Aragão, L. E. O. C.; Galbraith, D.; Huntingford, R.; Fisher, P.; Zelazowski, S.; Sitch, C.; McSweeney, C.; Meir, P. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, n. 49, p. 20610-20615, 2009. <https://doi.org/10.1073/pnas.080461910>

Malhi, Y.; Melack, J.; Gatti, L. *et al.*, 2021. Chapter 6: Biogeochemical Cycles of the Amazon. *In*: Nobre, C. A.; Encalada, E.; Anderson, F. H. *et al.* 2021. Science Panel for the Amazon (2021). Amazon Assessment Report 2021 – Part I. Available in: <https://www.theamazonwewant.org/science-panel-for-the-amazon/> - Accessed in Dez, 2024.

MAPBIOMAS – Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil.

Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/infograficos/> Acesso: Dez, 2024.

Marengo, J. A.; Jimenez, J. C.; Espinoza, J. C.; Cunha, A. P.; Aragão, L. E. Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone. **Scientific reports**, v. 12, n. 1, p. 457, 2022. <https://www.nature.com/articles/s41598-021-04241-4>

Martin, S. T. Regeneration of secondary forest following anthropogenic disturbance from 1985 to 2021 for Amazonas, Brazil. **Global Change Biology**, v. 30, n. 10, p. e17514, 2024.

Nobre, C. A.; Sampaio, G.; Borma, L. S.; Castilla-Rubio, J. C.; Silva, J. S.; Cardoso, M. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 39, p. 10759-10768, 2016. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>

Nunes, S.; Oliveira, L.; Siqueira, J.; Morton, D. C.; Souza, C. M. Unmasking secondary vegetation dynamics in the Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 3, p. 034057, 2020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab76db>

Oliveira, L. R. Avaliação do papel de florestas primárias e secundárias no serviço ecossistêmico de regulação climática em regiões da Amazônia. 2023. 70 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023.

Oliveira, R. G.; Júnior, L. C. G. V.; da Silva, J. B.; Espíndola, D. A.; Lopes, R. D.; Nogueira, J. S.; ...; Rodrigues, T. R. Temporal trend changes in reference evapotranspiration contrasting different land uses in southern Amazon basin. **Agricultural Water Management**, v. 250, p. 106815, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106815>

Pires, G. F.; Costa, M. H. Deforestation causes different subregional effects on the Amazon bioclimatic equilibrium. **Geophysical Research Letters**, v. 40, p. 3618–3623, 2013. <http://dx.doi.org/10.1002/grl.50570>.

PRODES – Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia por Satélites, 2024. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: Dez, 2024.

Running, S., W.; Mu, Q.; Zhao, M.; Moreno, A. User’s Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6.1). **NASA**, p. 1-34, 2021. https://lpdaac.usgs.gov/documents/931/MOD16_User_Guide_V61.pdf

Schwartz, N. B.; Aide, T. M.; Graesser, J.; Grau, H. R.; Uriarte, M. Reversals of reforestation across Latin America limit climate mitigation potential of tropical forests. **Frontiers in**

- Forests and Global Change**, v. 3, p. 85, 2020. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00085>
- Scott, C. E.; Monks, S. A.; Spracklen, D. V.; Arnold, S. R.; Forster, P. M.; Rap, A.; ...; Wilson, C. Impact on short-lived climate forcers increases projected warming due to deforestation. **Nature communications**, v. 9, n. 1, p. 157, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02412-4>
- Shukla, J.; Nobre, C.; Sellers, P. Amazon deforestation and climate change. **Science**, v. 247, n. 4948, p. 1322-1325, 1990. <https://doi.org/10.1126/science.247.4948.1322>
- Silva Junior, C. H. L.; Heinrich, V. H. A.; Freire, A. T. G.; Broggio, I. S.; Rosan, T. M.; Doblas, J.; Anderson, L.O.; Rousseau, G. X.; Shimabukuro, Y. E.; Silva, C. A.; House, J. I.; Aragão, L. E.O. C. Benchmark maps of 33 years of secondary forest age for Brazil. **Scientific Data**, v. 7, n. 1, p. 269, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00600-4>
- Silva Junior, Celso HL *et al.* Forest fragmentation and fires in the eastern Brazilian Amazon–Maranhão State, Brazil. **Fire**, v. 5, n. 3, p. 77, 2022. <https://www.mdpi.com/2571-6255/5/3/77>
- Smith, C. C.; Espírito-Santo, F. D.; Healey, J. R.; Young, P. J.; Lennox, G. D.; Ferreira, J.; Barlow, J. Secondary forests offset less than 10% of deforestation-mediated carbon emissions in the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, v. 26, n. 12, p. 7006-7020, 2020. <https://doi.org/10.1111/gcb.15352>
- Sorribas, M. V.; Paiva, R. C.; Melack, J. M.; Bravo, J. M.; Jones, C.; Carvalho, L.; ...; Costa, M. H. Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. **Climatic change**, v. 136, n. 3, p. 555-570, 2016. DOI: [10.1007/s10584-016-1640-2](https://doi.org/10.1007/s10584-016-1640-2)
- Staal, A.; Flores, B. M.; Aguiar, A. P. D.; Bosmans, J. H.; Fetzer, I.; Tuinenburg, O. A. Feedback between drought and deforestation in the Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 4, p. 044024, 2020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab738e>
- Staal, A.; Tuinenburg, O. A.; Bosmans, J. H. C.; Holmgren, M.; van Nes, E. H.; Scheffer, M.; Zemp, D. C.; Dekker, S. C. Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 6, p. 539–543, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0177-y>
- Strand, J.; Soares-Filho, B.; Costa, M. H.; Oliveira, U.; Ribeiro, Sonia C.; Pires, G. F.; Oliveira, A.; Rajão, R.; May, P.; Van Der Hoff, R.; Siikamäki, J.; Da Motta, R.; Toman, M. Spatially explicit valuation of the Brazilian Amazon forest's ecosystem services. **Nature Sustainability**, v. 1, n. 11, p. 657-664, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0175-0>
- Turner, M. G. Disturbance and landscape dynamics in a changing world. **Ecology**, v. 91, n. 10, p. 2833-2849, 2010. <https://doi.org/10.1890/10-0097.1>
- Vilanova, R. S.; Delgado, R. C.; de Andrade, C. F.; dos Santos, G. L.; Magistrali, I. C.; de Oliveira, C. M. M.; ...; Ávila Rodrigues, R. Vegetation degradation in ENSO events: Drought assessment, soil use and vegetation evapotranspiration in the Western Brazilian

Amazon. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 23, p. 100531, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100531>

Von Randow, R. D. C. S.; Tomasella, J.; von Randow, C.; de Araújo, A. C.; Manzi, A. O.; Hutjes, R.; Kruijt, B. Evapotranspiration and gross primary productivity of secondary vegetation in Amazonia inferred by eddy covariance. **Agricultural and forest meteorology**, v. 294, p. 108141, 2020.

Wang, Y.; Ziv, G.; Adami, M.; Almeida, C.; Antunes, J. F.; Coutinho, A. C.; Esquerdo, J. C.; Gomes, Al. R.; Galbraith, D. Upturn in secondary forest clearing buffers primary forest loss in the Brazilian Amazon. **Nature Sustainability**, v. 3, n. 4, p. 290-295, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0470-4>

Xu, X.; Zhang, X.; Riley, W.; Xue, Y.; Nibre, C.; Lovejoy, T.; Jia, G. Deforestation triggering irreversible transition in Amazon hydrological cycle. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 3, p. 034037, 2022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4c1d>

Yang, Y.; Saatchi, S.; Xu, L.; Keller, M.; Corsini, C.; Aragão, R.; L., E., O., C.; Aguiar, A., P.; Knyazikhin, Y.; Myneni, R., B. Interannual variability of carbon uptake of secondary forests in the Brazilian Amazon (2004-2014). **Global Biogeochemical Cycles**, v. 34, n. 6, p. e2019GB006396, 2020. <https://doi.org/10.1029/2019GB006396>