

**LAIS ROSA OLIVEIRA**

**AVALIAÇÃO DO PAPEL DE FLORESTAS PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS NO  
SERVIÇO ECOSISTÊMICO DE REGULAÇÃO CLIMÁTICA EM REGIÕES DA  
AMAZÔNIA**

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  
2023**

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

T

O48a  
2023

Oliveira, Lais Rosa, 1993-  
Avaliação do papel de florestas primárias e secundárias no serviço ecossistêmico de regulação climática em regiões da Amazônia: / Lais Rosa Oliveira. - Viçosa, MG, 2023.  
1 dissertação eletrônica (69 f.): il. (algumas color.).  
Inclui anexo.  
Inclui apêndices.  
Orientador: Gabrielle Ferreira Pires  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, 2023.  
Inclui bibliografia.  
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.324>  
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Climatologia florestal; 2. Vegetação e clima; 3. Ecossistemas; 4. Desmatamento - Amazônia; I. Pires, Gabrielle Ferreira II. Universidade Federal de Viçosa.. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada III.  
Titulo

CDD 22. ed. 551.66

Bibliotecário(a) responsável: BRUNA SILVA CRB-6/2552


**LAIS ROSA OLIVEIRA**

**AVALIAÇÃO DO PAPEL DE FLORESTAS PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS NO SERVIÇO ECOSISTÊMICO DE REGULAÇÃO CLIMÁTICA EM REGIÕES DA AMAZÔNIA**

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: 28 de fevereiro de 2023

Assentimento:

Documento assinado digitalmente  
 LAIS ROSA OLIVEIRA  
Data: 26/05/2023 11:07:00-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Lais Rosa Oliveira  
Autora

Documento assinado digitalmente  
 GABRIELLE FERREIRA PIRES  
Data: 26/05/2023 11:20:38-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Gabrielle Ferreira Pires  
Orientadora

*A Deus, Criador, Senhor e Salvador da  
minha vida. Ao meu pai Sebastião e à minha  
mãe Neusa (in memoriam), exemplos de  
superação e honestidade. Aos meus  
familiares, por todo incentivo e apoio. Aos  
meus fiéis e verdadeiros amigos pelos  
momentos de companheirismo.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus pelo fôlego de vida e por ser meu amigo fiel, protetor e consolador em todos os momentos da minha caminhada.

Aos meus pais, Sebastião e Neusa (*in memoriam*), pelas orações, pelo amor, cuidado, apoio e incentivo incondicional em cada passo da minha caminhada.

A Universidade Federal de Viçosa por proporcionar através da infraestrutura e dos excelentes profissionais a oportunidade de me tornar uma profissional capacitada não só para o mercado de trabalho, mas para a vida!

A minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Gabrielle Pires, pelas oportunidades concedidas, pela orientação, conselhos, confiança, apoio e ensinamentos singulares que me fizeram crescer, amadurecer e acreditar em mim como pessoa e profissional.

Aos meus amigos e irmãos da AD Madureira em Viçosa, pelos momentos maravilhosos compartilhados e por todo companheirismo ao longo da caminhada.

A Livinha e ao Humberto por todo apoio e incentivo emocional. Por contribuírem no desenvolvimento desse estudo e estarem sempre prontos a ajudar.

Aos professores Marcos Heil Costa e Aline Pontes Lopes pelo aceite de participação e contribuições na banca de defesa.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, pelos ensinamentos e contribuições para minha formação profissional e científica.

A Graça Freitas por toda eficiência, proatividade e disposição em auxiliar em diversas questões no decorrer do meu mestrado.

Aos meus amigos do CLIMAP, Raoni, Vivi e Natan por estarem sempre dispostos a compartilhar seus conhecimentos e tornarem o ambiente de trabalho sempre harmonioso e agradável.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

A todos que de forma direta ou indireta tornaram essa etapa menos árdua e mais leve.

## RESUMO

OLIVEIRA, Lais Rosa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2023. **Avaliação do papel de florestas primárias e secundárias no serviço ecossistêmico de regulação climática em regiões da Amazônia.** Orientadora: Gabrielle Ferreira Pires.

Os ecossistemas florestais oferecem serviços indiscutivelmente essenciais para a manutenção do equilíbrio da vida na Terra. A perda da floresta e a modificação da cobertura e do uso da terra são fatores que contribuem para a degradação e alteração do serviço ecossistêmico de regulação climática prestado por esse tipo de ecossistema. Na Amazônia, esse serviço é fundamental para atividades agrícolas, mas pode ser reduzido com a perda florestal e mesmo com o surgimento da floresta secundária (FS), sua magnitude é incerta. Estudos observacionais mostram que a FS é o uso do solo que mais cresce na Amazônia e, geralmente, resulta do abandono de áreas com baixo teor de nutrientes para cultivo e previamente utilizadas para pastagem ou rotação (pousio) de terras cultiváveis. Diante disso, esse estudo teve como objetivo avaliar a mudança nos padrões de precipitação, temperatura da superfície terrestre (LST) e evapotranspiração (ET) nas áreas de FS em comparação com as áreas de floresta primária (FP) em três grandes regiões do bioma Amazônico e verificar a influência dessas coberturas na oferta do serviço ecossistêmico (SE) de regulação climática, dependendo da área de ocupação. Para isso, foram utilizados produtos de sensoriamento remoto com resoluções espaço-temporais elevadas. Com os dados de precipitação, foi calculada a anomalia residual de precipitação anual (ARPA) a fim de reduzir os efeitos da localização geográfica, elevação e variabilidade interanual. Nas análises das variáveis climáticas em função da área ocupada pelas coberturas florestais realizou-se o ajuste de modelos de regressão, para obter modelos matemáticos que descrevessem essa relação entre as variáveis. Os resultados encontrados indicam que, em geral, mesmo com a remoção dos efeitos de localização e fatores de larga escala da precipitação, ainda é possível verificar a influência, principalmente dos eventos de larga escala, nos *feedbacks* dos usos e coberturas da terra (LULC, da sigla em inglês). Comparando anualmente as respostas da FP e da FS, foi observado que, em geral, as regiões Central (CBA) e Leste do Bioma Amazônico (EBA) apresentam maior sensibilidade aos eventos climáticos El Niño Oscilação Sul (ENOS) e maior ET, em comparação com a região Sul do Bioma Amazônico (SBA). Como são regiões mais próximas ao Equador e com diferentes espécies florestais, sofrem com maior intensidade os impactos causados por esses eventos de larga escala e apresentam maior umidade, favorecendo o aumento da ET, do que a SBA. Além disso, verificou-se que a FP contribui mais para ocorrência de chuva, em relação à FS, na maioria dos anos e em todas as regiões.

Analisando as respostas das coberturas nas variáveis climáticas, verifica-se que, em geral, a FS não consegue recuperar o SE de regulação climática ofertado pela FP na região CBA, apresentando ARPA inferiores, ET inferiores e temperaturas elevadas. Nas regiões EBA e SBA, coberturas pequenas e intermediárias de FS aumentam as chuvas em comparação com a FP, embora esse comportamento se inverta para coberturas elevadas. Já na SBA, as ARPA da FP e FS são bem próximas para coberturas pequenas e intermediárias, e para coberturas elevadas a FS apresenta precipitação superior à da FP. No entanto, esse comportamento pode ser influenciado pelo histórico uso do solo, condições edafoclimáticas, tipo de cobertura no entorno da FS e a distribuição espacial (fragmentada ou concentrada) das florestas ao longo da extensão das regiões. Essas informações, a serem refinadas em estudos futuros, podem contribuir para o avanço do conhecimento sobre os efeitos da cobertura de FP e FS no clima local e/ou regional e no desenvolvimento de políticas de conservação de ecossistemas e restauração de áreas degradadas. Espera-se que estes estudos possam subsidiar tomadas de decisões mais eficientes e baseadas não somente em estimativas de sequestro de carbono, mas também em estimativas de incremento na provisão de serviços ecossistêmicos de regulação climática.

**Palavras-Chave:** Interação Biosfera Atmosfera. Serviço Ecossistêmico. Regulação Climática.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Lais Rosa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2023. **Evaluation of the role of primary and secondary forests in the ecosystem service of climate regulation in regions of the Amazon.** Advisor: Gabrielle Ferreira Pires.

Forest ecosystems offer services that are indisputably essential to maintain the balance of life on Earth. Forest loss and changes in land cover and use are factors that contribute to the degradation and alteration of the climate regulation ecosystem service provided by this type of ecosystem. In the Amazon, this service is essential for agricultural activities, but it can be reduced with forest loss and even with the emergence of secondary forest (SF), its magnitude is uncertain. Observational studies show that FS is the fastest growing land use in the Amazon and generally results from the abandonment of areas with low nutrient content for cultivation and previously used for pasture or rotation (fallow) of arable land. Therefore, this study aimed to evaluate the change in precipitation, land surface temperature (LST) and evapotranspiration (ET) patterns in FS areas compared to primary forest (FP) areas in three major regions of the Amazon biome and to verify the influence of these land covers on the offer of the climate regulation ecosystem service (SE), depending on the area of occupation. For this, remote sensing products with high space-time resolutions were used. From the precipitation data, the residual annual precipitation anomaly (ARPA) was calculated in order to reduce the effects of geographic location, elevation and interannual variability. In the analysis of climate variables as a function of the area occupied by forest cover, regression models were adjusted to obtain mathematical models that described this relationship between the variables. The results indicate that, in general, even with the removal of location effects and large-scale precipitation factors, it is still possible to verify the influence, mainly of large-scale events, on land use and land cover feedbacks (LULC). Comparing the responses of FP and FS annually, in general, the Central (CBA) and Eastern regions of the Amazon Biome (EBA) show greater sensitivity to El Niño Southern Oscillation (ENOS) and greater ET, in comparison with the southern region of the Amazon Biome (SBA). As they are regions closer to the Equator and with different forest species, they suffer more intensely from the impacts caused by these large-scale events and have higher humidity, favoring the greater increase of ET, than the SBA. In addition, it was verified that PF contributes more to the occurrence of rain, in relation to FS, in most years and in all regions. Analyzing the land cover responses in the climate variables, it is verified that, in general, the FS is not able to recover the SE of climate regulation offered by the FP in the CBA region, presenting lower ARPA, lower ET and higher temperatures. In the EBA and SBA

regions, small and intermediate FS cover fractions increase rainfall compared to FP, although this behavior is reversed for high cover fractions. In the SBA, the ARPA of FP and FS are very close for small and intermediate cover fractions, while for high coverage FS presents higher precipitation than FP. However, this behavior can be influenced by the land use history, edaphoclimatic conditions, land cover type around the FS and the spatial distribution (fragmented or concentrated) of forests along the extension of the regions. This information, to be refined in future studies, can contribute to the advancement of knowledge about the effects of FP and FS coverage on the local and/or regional climate and in the development of policies for the conservation of ecosystems and restoration of degraded areas. These studies could support more efficient decision-making based not only on estimates of carbon sequestration, but also on estimates of increments in the provision of climate regulation ecosystem service.

**Keywords:** Biosphere Atmosphere Interaction. Ecosystem Service. Climate Regulation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1.</b> Distribuição espacial de alguns usos e coberturas do solo no bioma Amazônico no ano de 2018 com a identificação das regiões de estudo: CBA, EBA e SBA e indicação dos estados que ocupam o bioma: AC - Acre, AP - Amapá, AM - Amazônia, MA - Maranhão, MT - Mato Grosso, PA - Pará, RO - Rondônia, RR - Roraima e TO – Tocantins e da altitude ao longo do bioma (canto inferior esquerdo). .....	23
<b>Figura 2.</b> Representação da metodologia utilizada para obtenção da fração de área de FS por pixel para o período entre 1988 a 2018. ....	31
<b>Figura 3.</b> Distribuição espacial da cobertura correspondente à FP nas regiões CBA, EBA e SBA para o período de 1988 a 2018. ....	36
<b>Figura 4.</b> Distribuição espacial da cobertura de FS nas regiões CBA, EBA e SBA para o período de 1988 a 2018. ....	37
<b>Figura 5.</b> Distribuição espacial da idade da FS nas regiões CBA, EBA e SBA para o período de 1986 a 2020. ....	38
<b>Figura 6.</b> Distribuição espacial das ARPA nas regiões CBA, EBA e SBA para o período de 1988 a 2018. ....	39
<b>Figura 7.</b> ARPA médias para o período entre 1988 e 2018 nas regiões (a) CBA, (b) EBA e (c) SBA. ....	41
<b>Figura 8.</b> Distribuição espacial da evapotranspiração nas regiões CBA, EBA e SBA para o período de 2001 a 2018. ....	42
<b>Figura 9.</b> Evapotranspiração total anual média para o período entre 2001 e 2018 nas regiões (a) CBA, (b) EBA e (c) SBA. ....	43
<b>Figura 10.</b> Distribuição espacial da temperatura da superfície nas regiões CBA, EBA e SBA para o período de 2001 a 2018. ....	44
<b>Figura 11.</b> Temperatura média anual da superfície para o período entre 2001 e 2018 nas regiões (a) CBA, (b) EBA e (c) SBA. ....	45
<b>Figura 12.</b> Anomalias residuais médias de precipitação anual correspondente à cobertura de FP e FS nas regiões (a) CBA, (b) EBA e (c) SBA com o intervalo de confiança a 95% dos dados observados (barra de erro) e dos modelos (em cinza). ....	46
<b>Figura 13.</b> Evapotranspiração total anual média correspondente à cobertura de FP e FS nas regiões (a) CBA, (b) EBA e (c) SBA. ....	48
<b>Figura 14.</b> Temperatura média da superfície correspondente à cobertura de FP e FS nas regiões (a) CBA, (b) EBA e (c) SBA. ....	49
<b>Figura 15.</b> Distribuição espacial da precipitação total anual (mm/ano) de 1986 a 2020 para as regiões CBA, EBA e SBA, elaborada com dados do CHIRPS. ....	63

**Figura 16.** Distribuição espacial da (a) climatologia da precipitação anual para o período entre 1988-208, (b) precipitação estimada pelo modelo polinomial de terceiro grau e (c) diferença entre a climatologia e a precipitação estimada. .... 64

**Figura 17.** Distribuição de frequência da idade da FS por ano nas regiões CBA, EBA e SBA. .... 68

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Resumo dos resultados dos modelos de regressão aplicados à climatologia da precipitação no período entre 1988 e 2018 para as regiões CBA, EBA e SBA..... 65
- Tabela 2.** Relação da quantidade de observações (pixels de 1 km<sup>2</sup>) de cada região por ano para as coberturas de FP e FS..... 66
- Tabela 3.** Relação da quantidade de observações (pixels de 1 km<sup>2</sup>) de cada região por porcentagem de área das coberturas de FP e FS..... 67

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ARPA	Anomalia Residual de Precipitação Anual
BGF	Biogeofísicos
BGQ	Biogeoquímicos
CBA	Central do Bioma Amazônico
CDO	Climate Data Operators
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations
EBA	Leste do Bioma Amazônico
ENOS	El Niño Oscilação Sul
EP	Erro-padrão
ET	Evapotranspiração
FAO	Organização de Alimentação e Agricultura
FPAR	Fração de Radiação Fotossinteticamente Ativa
GEE	Google Earth Engine
GNSS	Global Navigation Satellite System
IC	Intervalo de Confiança
LAI	Índice de Área Foliar anual
LE	Fluxo de Calor Latente Médio
LULC	Uso e cobertura da Terra
LST	Temperatura da Superfície Terrestre
MapBiomas	Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso da Terra do Brasil
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCL	NCAR Command Language
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PRODES	Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite
SBA	Sul do Bioma Amazônico
SE	Serviço Ecológico
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
FP	Floresta Primária
FS	Floresta Secundária
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
2.	REVISÃO DE LITERATURA .....	18
2.1	Serviços ecossistêmicos (SE).....	18
2.2	Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).....	18
2.3	Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).....	19
2.4	El Niño Oscilação Sul (ENOS).....	19
3.	OBJETIVOS.....	22
3.1	Objetivo Geral.....	22
3.2	Objetivos Específicos .....	22
4.	METODOLOGIA.....	23
4.1	Área de Estudo.....	23
4.2	Base de Dados.....	24
4.2.1	Floresta Primária (FP) e Floresta Secundária (FS).....	24
4.2.2	Idade da Floresta Secundária.....	26
4.2.3	Precipitação .....	26
4.2.4	Temperatura.....	27
4.2.5	Evapotranspiração (ET).....	28
4.2.6	Elevação.....	28
4.3	Tratamento dos dados .....	29
4.3.1	Floresta Primária e Floresta Secundária .....	29
4.3.2	Precipitação, Evapotranspiração, Temperatura e Elevação.....	31
4.4	Métodos e Análises .....	32
4.4.1	Cálculo da Anomalia Residual da Precipitação Anual (ARPA) .....	32
4.4.2	Análise da ARPA, evapotranspiração e temperatura em função dos anos e da extensão da FP e FS.....	34
5.	RESULTADOS .....	36
5.1	Distribuição espacial da FP e da FS e da idade da FS .....	36
5.2	Análises Anuais .....	39
5.2.1	Anomalias residuais de precipitação anual (ARPA) nas regiões CBA, EBA e SBA 39	
5.2.2	Evapotranspiração total anual nas regiões CBA, EBA e SBA .....	42
5.2.3	Temperatura média anual nas regiões CBA, EBA e SBA.....	43
5.3	Análises por porcentagem de área de FP e FS.....	46

5.3.1	Anomalias residuais de precipitação anual (ARPA) .....	46
5.3.2	Evapotranspiração .....	47
5.3.3	Temperatura.....	48
6.	DISCUSSÃO.....	50
7.	CONCLUSÃO.....	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56
	APÊNDICE A .....	63
	A1 – Variabilidade da precipitação total anual nas regiões CBA, EBA e SBA, elaborada com dados do CHIRPS.....	63
	A2 – Diferença entre precipitação estimada pelo modelo polinomial de terceiro grau e a precipitação absoluta da climatologia do período entre 1988 e 2018.....	64
	A3 – Resumo dos resultados da implementação dos modelos de regressão nos dados de climatologia da precipitação no período entre 1988 a 2018 para as três regiões. ....	65
	A4 – Quantidade de observações obtidas na extração pixel a pixel por ano e por porcentagem de área das coberturas de FP e FS em cada região .....	66
	A5 – Gráficos de distribuição de frequência da idade da FS no período entre 1986 e 2020 nas regiões CBA, EBA e SBA.....	68
	ANEXO A .....	69
	ANEXO A1 - Classificação dos eventos de El Niño e La Niña de acordo com o Índice Niño Oceânico (ONI) entre 1950 e 2023.....	69

## 1. INTRODUÇÃO

Os benefícios ou serviços oferecidos naturalmente pelos ecossistemas são indiscutivelmente essenciais para a manutenção do equilíbrio da vida na Terra. Em 2021, foi lançada oficialmente “A Década das Nações Unidas da Restauração de Ecossistemas”, proposta em 2019 pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e pela Organização de Alimentação e Agricultura (FAO, da sigla em inglês). A meta dessa proposta é combater a degradação e promover a restauração dos ecossistemas mundiais até 2030 (PNUMA, 2019).

A degradação de ecossistemas pode ocorrer de diferentes formas, como por meio do desmatamento. Em razão do crescimento populacional, o desmatamento para desenvolvimento de práticas agrícolas apresenta comportamento progressivo (EMBRAPA, 2018). Em 2021, o Projeto de Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite (PRODES) indicou um aumento de 185% do desmatamento na Amazônia em relação ao ano de 2012, quando foi registrada a menor taxa de desmatamento desde 1988 (INPE, 2021).

Os estudos de Costa e Pires (2010) e Leite-Filho et al. (2019, 2021) apontam que esse desflorestamento influencia nos padrões espaço-temporais, na quantidade de chuva e na duração da estação chuvosa da região amazônica. Essa influência da presença ou ausência do ecossistema florestal no clima pode ocorrer por meio de processos biogeoquímicos (BGQ), através da alteração dos gases e aerossóis presentes na atmosfera, e biogeofísicos (BGF), por meio dos fluxos de água e calor entre a superfície terrestre e a atmosfera (FOLEY et al., 2003; L. WANG et al., 2020; BORMA et al., 2022).

Dessa forma, compreende-se que a modificação ou a perda florestal pode causar variações nos processos BGQ e BGF e, conseqüentemente, provocar mudanças na oferta de serviços ecossistêmicos (SE), como a regulação do clima. O SE de regulação climática tem como função regular processos referentes à composição química atmosférica e elementos climáticos, tanto em escala global quanto local (COSTANZA et al., 1997; BORMA et al., 2022). Na Amazônia, esse serviço é fundamental para o desenvolvimento da agricultura, pois sustenta a produtividade das culturas agrícolas (COSTA et al., 2019).

No entanto, o estudo de Leite-Filho et al. (2021) aponta que os locais mais afetados pela redução da precipitação em razão do desmatamento são as principais zonas de produção de soja ou regiões onde a agricultura provavelmente se expandirá no futuro. Isto indica que, mesmo o desflorestamento favorecendo a expansão de práticas agrícolas, ele pode provocar impactos negativos no próprio desenvolvimento da agricultura por afetar o regime climático da região.

Vale ressaltar que existem dois tipos de desmatamento: por degradação sucessiva (as florestas são submetidas a extrações graduais até que a área seja desmatada por completo) e por corte raso (ocorre uma remoção de toda floresta em uma área específica). Nos dois casos, esses locais podem ser utilizados para pastagem e/ou uso agrícola e, quando passam a apresentar baixo teor de nutrientes para cultivo (VON RANDOW et al., 2020) ou não atendem mais a interesses econômicos (BORMA et al., 2022) são abandonadas. A partir do processo de regeneração florestal natural surge a floresta secundária (FS) após o abandono.

A FS é a cobertura da terra que mais cresce na Amazônia (SARAIVA et al., 2020), cobrindo cerca de 21% das áreas desmatadas (INPE, 2021). Estudos apontam que essa floresta é essencial para mitigação das mudanças climáticas por ser muito produtiva, ter alto potencial de remoção de carbono da atmosfera e apresentar maior evapotranspiração (ET) em relação à floresta primária (FP) (POORTER et al., 2016; SILVA JUNIOR et al., 2020; VON RANDOW et al., 2022). A capacidade da água evapotranspirada de absorver energia, resfriando a superfície e aumentando a umidade do ar, e contribuir para formação de nuvens, promovendo maior ocorrência de chuva, influência diretamente no SE de regulação climática.

Contudo, para cumprir esse papel de mitigação, é necessário que a FS tenha capacidade de se recuperar e desenvolver sob novas condições climáticas (ELIAS et al., 2020) e prover o SE de regulação do clima que a FP oferece. Isso pode ser desafiador mediante o desmatamento dessa cobertura na Amazônia. Entre 2008 e 2014, o estudo de L. Wang et al. (2020) aponta um aumento de  $(187 \pm 48)$  % na perda de FS e Schwartz et al. (2020) afirma que a FS pode não conseguir ocupar de forma expressiva o local onde nasce por ser removida antes dos 20 anos de idade.

Além de depender da capacidade de se adaptar às condições climáticas, o crescimento da FS está associado às condições edáficas e à história do uso do solo (JAKOVAC et al., 2021). As modificações do solo ao longo dos anos em conjunto com as práticas a serem desenvolvidas após o abandono, influenciam no processo de regeneração definindo o tipo de floresta que irá crescer no local, com potencial de ser uma floresta de dossel fechado ou aberto (JAKOVAC et al., 2021; BORMA et al., 2022). Esse processo pode ocorrer através da deposição de sementes perdidas em resposta à queima, pelo vento ou por animais, por porta-enxertos rebrotados ou por propágulos vegetativos (CHAZDON et al., 2020).

No estudo de Jakovac et al., (2021) fica evidente que os caminhos sucessionais da FS variam entre e no interior das paisagens, com diferentes taxas de recuperação, estrutura e composição de espécies dependendo do histórico do uso do solo e das condições do local. O desenvolvimento da floresta pode ser afetado por esses fatores pois, envolve perturbações na dinâmica espacial e temporal do solo e do clima, que podem resultar na perda de habitats, diminuição da biodiversidade, alterações na estrutura do ecossistema e nos ciclos de nutrientes que afetam a disponibilidade de espécies para sucessão (JAKOVAC et al., 2021).

Nesse contexto em que a FS é fundamental para mitigar mudanças climáticas, mas enfrenta desafios para se expandir, ainda existe uma incógnita a ser respondida: a área coberta por FS é capaz de disponibilizar o SE de regulação do clima concedido pela área com FP? Esse questionamento torna evidente a importância de estudos que descrevam o comportamento de variáveis climáticas nas áreas de FS e FP, com o intuito de avaliar a influência de cada tipo de cobertura no clima e investigar a dinâmica dessas variáveis em função da idade e da área de ocupação da FS.

Até o momento, não foi identificado um estudo que tenha realizado essa abordagem utilizando dados de alta resolução espacial, no âmbito dos dados climáticos e de floresta, para uma série histórica abrangente. Esse estudo buscou preencher essa lacuna visando esclarecer sobre a interação entre a FS e a FP, com algumas variáveis climáticas que influenciam no SE de regulação do clima. Estas informações podem contribuir para o desenvolvimento de políticas de conservação dos ecossistemas florestais e mitigação dos impactos no clima.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Serviços ecossistêmicos (SE)**

Os serviços ecossistêmicos (SE) podem ser compreendidos como benefícios oferecidos pelos ecossistemas de forma gratuita e natural aos seres humanos (COSTANZA et al., 1997; MEDEIROS et al., 2011; COSTANZA et al., 2017). A Avaliação do Ecossistema do Milênio (Millenium Ecosystem Assessment - MEA) classifica esses serviços em quatro categorias: provisão, regulação, cultural e suporte (MEA, 2005).

Os serviços de suporte estão relacionados com a contribuição dos ecossistemas para a produção de outros serviços ecossistêmicos (ciclagem de nutrientes, formação do solo e dispersão de sementes). Já os serviços de provisão são os produtos ou benefícios obtidos diretamente dos ecossistemas, como alimentos, água, fibras, recursos genéticos, informação e energia (MEA, 2005). No caso dos serviços culturais são considerados os benefícios não materiais providos pelos ecossistemas, que envolvem questões como recreação, turismo, identidade cultural, experiências espirituais e desenvolvimento intelectual (BRASIL, 2021).

Por fim, os serviços de regulação se referem aos processos que atuam como reguladores dos elementos atmosféricos e climáticos (sequestro de carbono, a purificação do ar, a moderação de eventos climáticos extremos, a manutenção do equilíbrio do ciclo hidrológico, a minimização de enchentes e secas) (COSTANZA et al., 1997; BRASIL, 2021; BORMA et al., 2022). Esse serviço é essencial para o desenvolvimento da agricultura na região amazônica, pois sustenta a produtividade das culturas agrícolas (COSTA et al., 2019), entretanto, pode sofrer impactos negativos com as mudanças climáticas e com as mudanças no uso e na cobertura da terra (LULC, sigla em inglês).

### **2.2 Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)**

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é um sistema meteorológico que consiste em uma formação de nuvens sobre a bacia Amazônica que se estende de noroeste a sudeste do Brasil (abrangendo parte da CBA e da SBA) até o Oceano Atlântico (CARVALHO E JONES, 2007) devido ao encontro das massas de ar vindo das zonas de alta (Atlântico Sul) para baixa pressão (região equatorial).

No que diz respeito à variação espacial, a ZCAS pode ser classificada como oceânica ou continental, onde a oceânica sofre influência predominante da onda de Rossby e das temperaturas do oceano na região do Atlântico Sul, enquanto a continental está relacionada à inibição da convecção ao longo da costa da região nordeste do país. Quanto à intensidade, a ZCAS se divide em fraca e intensa, que se associa as anomalias intrasazonais de ventos de oeste e de leste, respectivamente, de baixos níveis (CARVALHO *et al.*, 2004).

Durante o fim da primavera e o verão, esse sistema meteorológico é intensificado por causa do aumento da temperatura da superfície, causando a ascensão do ar quente e úmido na atmosfera. Com isso, nesses períodos, a ZCAS promove chuvas intensas na região sul e sudoeste da Amazônia.

### **2.3 Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)**

A ZCIT pode ser definida como a região onde os ventos alísios que deslocam das zonas de alta pressão (trópicos) em direção à zona de baixa pressão (Equador) se encontram e convergem (FERREIRA e MELLO, 2005; HASTENRATH, 2012). Essa convergência provoca intensa formação de nuvens e chuvas frequentes nas regiões equatoriais. Dependendo da época do ano, a ZCIT se desloca latitudinalmente, na direção sul (próximo a 2° S, englobando a parte norte da CBA e da EBA) nos meses de março e abril e na direção norte (próximo a 14° N) nos meses de agosto e setembro (MELO *et al.*, 2009).

Essa variação no posicionamento da ZCIT é determinada pela variabilidade de temperatura do Oceano Atlântico nos trópicos (AMBRIZZI *et al.*, 2004; FERREIRA e MELLO, 2005; HASTENRATH, 2012; MARENGO *et al.*, 2018; CAI *et al.*, 2020) que é conhecida como Dipolo do Atlântico. O Dipolo do Atlântico está relacionado com a mudança na anomalia da temperatura da superfície do mar, podendo ser potencializada com a ocorrência de eventos ENOS.

Na fase positiva do Dipolo Atlântico, a temperatura das águas do Atlântico Norte é mais elevada (mais quentes) que as do Atlântico Equatorial e do Atlântico Sul. Dessa forma, o aquecimento das águas inibe a formação de nuvens na região amazônica, podendo ocasionar períodos de seca (AMBRIZZI *et al.*, 2004; CAVALCANTI, 2012), entretanto, é importante ressaltar que as maiores secas dessa região são associadas aos eventos de El Niño. Durante a fase negativa, esse comportamento é invertido, favorecendo a formação de nuvens e possibilitando maior ocorrência de chuvas.

### **2.4 El Niño Oscilação Sul (ENOS)**

O ENOS é um fenômeno anormal que provoca oscilações (positiva ou negativa) na temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico Equatorial, influenciando o clima de algumas partes do Brasil, como o da região Amazônica. As variações positivas e negativas são conhecidas como El Niño e La Niña, respectivamente (AMBRIZZI *et al.*, 2004).

Resumidamente, o ENOS pode ser caracterizado quando ocorre o fortalecimento ou o enfraquecimento dos ventos alísios, provocando alterações nos gradientes de temperatura e pressão entre as partes leste (costa da América do Sul) e oeste (costa da Austrália e Indonésia) do Pacífico Equatorial. Esse gradiente de pressão gera uma circulação zonal, conhecida como célula de Walker, que varia de posição com a ocorrência dos ENOS.

Normalmente, no Pacífico Tropical ocorrem dois deslocamentos que contribuem para formação desses gradientes. Um deles é o deslocamento longitudinal das águas superficiais quentes da costa da América do Sul na direção oeste, por meio dos ventos alísios. Esse movimento provoca o aumento da temperatura nas águas superficiais da parte oeste do Pacífico Equatorial, gerando uma zona de baixa pressão que favorece a formação de nuvens e ocorrência de chuvas nesse local (GIRALT *et al.*, 2007).

O segundo deslocamento é o ascendente das águas frias (fenômeno conhecido como Ressurgência) que derivam das regiões subpolares e chegam no Pacífico Tropical através da Corrente de Humboldt. Nesse caso, esse movimento causa o resfriamento das águas superficiais da costa leste do Pacífico Equatorial e, conseqüentemente, uma zona de alta pressão que inibe a ocorrência de chuvas nessa região (FERREIRA E MELLO, 2005; SILVA *et al.*, 2016).

Nos anos de El Niño e La Niña ocorre uma anormalidade desses deslocamentos devido ao enfraquecimento e fortalecimento dos ventos alísios, respectivamente. Assim, durante o El Niño as águas superficiais quentes não são deslocadas para o oeste do Pacífico Equatorial, ficando acumuladas nas partes central e leste do oceano. Com o aumento da temperatura nessa região, acaba se formando uma zona baixa pressão, enquanto na parte oeste do oceano e norte da América do Sul são formadas zonas de alta pressão.

Durante a La Niña ocorre o inverso, as águas frias que ressurgem na costa leste da América do Sul são deslocadas com maior intensidade na direção oeste, provocando a diminuição da temperatura na parte central e leste do Pacífico Equatorial. Assim, forma-se nessa região uma zona de alta pressão, enquanto na parte oeste do oceano e norte da América do Sul são formadas zonas de baixa pressão.

Essas mudanças na localização das zonas de pressão alteram os padrões climáticos de várias regiões, incluindo a Amazônia. A ocorrência de El Niño, por exemplo, provoca secas prolongadas que podem ter duração de até um ano e meio. Por outro lado, os eventos de La Niña promovem períodos chuvosos nessa região.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo Geral**

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o papel da floresta secundária na oferta do serviço ecossistêmico de regulação climática em comparação com o da floresta primária por meio de análises espaço-temporais da anomalia residual de precipitação anual (ARPA), temperatura da superfície (LST, da sigla em inglês) e evapotranspiração nas áreas (ET) de FS e FP nas regiões sul (SBA), leste (EBA) e central (CBA) do bioma Amazônico brasileiro.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

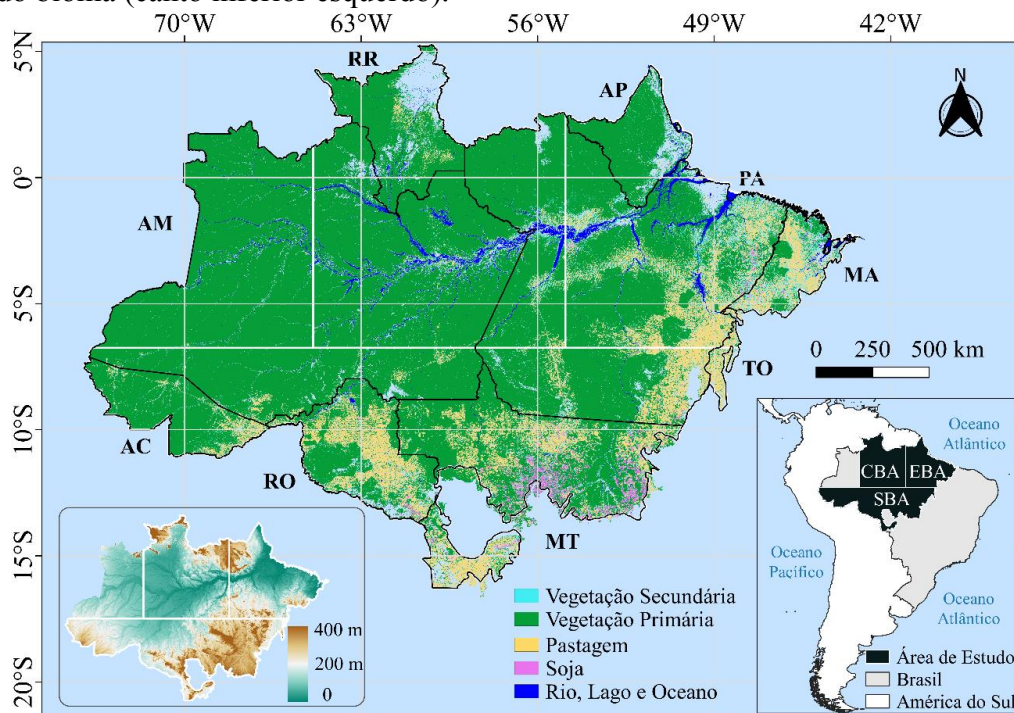
- a. Avaliar o comportamento da ARPA no período entre 1988 e 2018 e da ET e da LST no período entre 2001 e 2018;
- b. Analisar a influência da cobertura de FP e FS na ARPA, na ET e na LST;
- c. Verificar o impacto da idade da FS na ARPA, na ET e na LST;
- d. Obter modelos matemáticos que descrevam o comportamento da ARPA, da LST e da ET em função da área ocupada pela FP e FS.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Área de Estudo

Nesse estudo foram analisadas três regiões que fazem parte do bioma Amazônico brasileiro: central (CBA), leste (EBA) e sul (SBA). Com aproximadamente 4,2 milhões de km<sup>2</sup> de extensão territorial (IBF, 2020), esse bioma é ocupado por diferentes e essenciais ecossistemas, como o florestal, que ocupa um papel fundamental na manutenção das chuvas locais e regionais (MARENGO *et al.*, 2018). A Figura 1 apresenta a disposição espacial de alguns usos e coberturas da terra para o bioma Amazônico no ano de 2018, segundo os mapas da coleção 6 do MapBiomas (PROJETO MAPBIOMAS, 2022d), identifica as regiões de interesse e exibe no canto inferior esquerdo, a espacialização da elevação no bioma.

**Figura 1.** Distribuição espacial de alguns usos e coberturas do solo no bioma Amazônico no ano de 2018 com a identificação das regiões de estudo: CBA, EBA e SBA e indicação dos estados que ocupam o bioma: AC - Acre, AP - Amapá, AM - Amazônia, MA - Maranhão, MT - Mato Grosso, PA - Pará, RO - Rondônia, RR - Roraima e TO – Tocantins e da altitude ao longo do bioma (canto inferior esquerdo).



Fonte: Autora

A floresta Amazônica é um importante sumidouro e reservatório natural de carbono por absorver dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) da atmosfera e armazená-lo tanto na biomassa vegetal quanto no solo (PEZZI *et al.*, 2022; ZABANIOTOU *et al.*, 2020). Essa característica, em conjunto com a transpiração das florestas e a evaporação da água presente no solo, influencia no controle da precipitação regional e na promoção da reciclagem de pelo menos 50% da água

que abastece os ecossistemas aquáticos da bacia amazônica (STAAL *et al.*, 2018; SOUZA *et al.*, 2019).

No entanto, esses benefícios oferecidos pelo ecossistema florestal da Amazônia vêm sofrendo alterações por causa das mudanças no LULC, podendo gerar impactos no clima da região. O estudo de Pires e Costa (2013) afirma que essas respostas variam dependendo da taxa de desmatamento e da região do bioma Amazônico, com potencial de provocar mudanças nas características fisiológicas do ecossistema de forma irreversível, como a savanização.

Ainda segundo estes autores, na região mais interna ou central (compatível com a CBA deste estudo), por exemplo, foi observado um equilíbrio bioclimático. Ou seja, não foram encontradas alterações significativas que indiquem o alcance de um ponto de inflexão, provocando a transição de uma cobertura com floresta para savana. Já nas regiões mais externas (EBA e SBA) foi verificado uma tendência à sazonalização e savanização bioclimática, respectivamente (PIRES E COSTA, 2013; LOVEJOY E NOBRE, 2018).

Diante disso, nesse estudo, foram selecionadas as regiões CBA, EBA e SBA com o intuito de obter resultados para os diferentes bioclimas. Assumindo que a parte oeste do bioma apresenta bioclima similar à CBA e para facilitar o processamento das informações, essa área foi desconsiderada. A delimitação geográfica de cada região foi estabelecida manualmente no *software* QGIS, tomando como base nos estudos de Pires e Costa (2013) e Staal *et al.* (2018).

## **4.2 Base de Dados**

### **4.2.1 Floresta Primária (FP) e Floresta Secundária (FS)**

Foram utilizadas as classes FP e FS dos dados do Método Desmatamento da Coleção 6.0 do Projeto de mapeamento anual da cobertura e uso da terra do Brasil (PROJETO MAPBIOMAS (2022b)). O MapBiomas é uma iniciativa multi-institucional para gerar mapas anuais de LULC desde 1985 a partir de processos de classificação supervisionada — que classifica as imagens a partir do treinamento do classificador com amostras dos alvos a serem classificados — utilizando o algoritmo de aprendizagem de máquina *Random Forest* e imagens dos satélites *Landsat* (PROJETO MAPBIOMAS, 2022a).

Os dados do Método Desmatamento possuem resolução espacial de 30 m e resolução temporal anual para o período de 1988 a 2018. No processo de criação desses dados, foi realizado um ajuste dos mapas com o intuito de filtrar transições do LULC com áreas menores que 1 hectare (ha). Essa etapa auxilia na minimização dos ruídos da classificação, pois, anualmente é analisada a permanência da classe das áreas menores que 1 ha dentro de outra classe predominante. Caso essa transição não seja permanente de um ano para o outro, considera-se que ocorreu um ruído e as áreas inferiores a 1 ha são agrupadas à classe dominante.

Após esse ajuste, é realizado o mapeamento da FP e da FS por meio de um algoritmo que analisa a trajetória temporal de cada pixel. Para mapear a ocorrência de supressão da floresta (desmatamento), é observado se nos dois anos anteriores ao ano de interesse o pixel corresponde a qualquer classe de vegetação (Formação Campestre, Campo Alagado e Área Pantanosa, Outra Formação não Florestal, Formação Florestal, Formação Savânica, Mangue), e se no ano de interesse e no posterior o pixel é classificado como uso antrópico (Agricultura, Floresta Plantada, Pastagem, Mineração, Aquicultura, Infraestrutura Urbana, Outras Áreas não Vegetadas). Já o mapeamento da FS é feito através da observação da LULC presente na célula, de forma que nos dois anos anteriores deve ser indicado uso antrópico e, tanto no ano de interesse como nos três anos posteriores, é necessário identificar qualquer classe de floresta.

A partir dessa análise da trajetória dos pixels ao longo da série temporal, o algoritmo aloca cada pixel em uma das classes estabelecidas para o produto. Essas classes são identificadas por um código, sendo as de interesse para esse estudo as classes de FP (ID = 203) e FS (ID = 303), que indicam ausência de desmatamento a partir do ano-base e trajetória com presença de evento de recuperação para FS em anos anteriores, respectivamente. Maiores informações sobre o método, estão disponíveis em: <https://mapbiomas.org/metodo-desmatamento>.

É importante ressaltar que o Método do Desmatamento ainda está em desenvolvimento e, tanto os mapas quanto as estatísticas, podem apresentar inconsistências espaço-temporais. No entanto, a classificação dos dados está ancorada nos produtos do MapBiomas, que possuem uma metodologia consolidada e uma acurácia geral de aproximadamente 97% e discordância de alocação de 2,2% para o bioma Amazônico, considerando todas as classes do produto (PROJETO MAPBIOMAS, 2023c). Além disso, não foi encontrado outro banco de dados com alta resolução espacial e temporal abrangente para a área de estudo. A descrição completa da metodologia empregada para construção do conjunto de dados do MapBiomas pode ser acessada em: <https://mapbiomas.org/download-dos-atbds>.

#### **4.2.2 Idade da Floresta Secundária**

Foram utilizadas as informações de idade da FS do conjunto de dados elaborado por Silva Junior *et al.* (2020). A criação desse banco de dados foi realizada através da implementação de um algoritmo no GEE, usando os mapas de LULC do MapBiomas como entrada. Esses dados foram reclassificados em mapas binários para cada ano, onde foi atribuído o valor “1” para os pixels referentes à subclasse Formação Florestal e “0” para as demais classes e subclasses.

Como definição para mapear a FS, foi definido que o seu crescimento ocorre quando um pixel classificado como cobertura antrópica (pastagem, agricultura, área urbanizadas e outras) em um determinado ano é substituído no ano seguinte por um pixel de cobertura florestal (formação florestal). Assim, a partir dos mapas binários do MapBiomas, foi criado o mapa de incremento da FS, onde cada pixel de valor igual a 1 no ano analisado ( $y_i$ ;  $i = 1986$  até o último ano da coleção a ser utilizada do MapBiomas) e com valor 0 no ano anterior ( $y_{i-1}$ ;  $i = 1985$  até o último ano da coleção a ser utilizada do MapBiomas) foi mapeada como FS.

Para criação dos mapas de extensão foi realizada a soma sequencial dos anos a partir de 1986, sendo o mapa de extensão desse ano, o próprio mapa de incremento. Como essa soma gerou mapas onde os pixels continham valores maiores que 1, reclassificou-se os mapas atribuindo 1 para esses pixels. Por fim, para remover os pixels de FS que foram desmatados ao longo dos anos, multiplicou-se o mapa resultante pelo mapa binário gerado a partir da reclassificação dos dados originais do MapBiomas. Dessa forma, o pixel onde houve perda (igual a zero) será multiplicado pelo pixel do mapa de extensão, que também receberá o valor 0.

Para obter a idade da FS, também foi calculada a soma sequencial dos anos e, posteriormente, executou-se o mesmo procedimento anterior para garantir a remoção de pixels onde a FS foi desmatada. Vale ressaltar que, a idade real da FS no ano de 1986 pode não ser 1 ano pois, podem haver alguns pixels com FS mais velha. Entretanto, como não é possível resgatar a idade desse ano ou de anos anteriores, foi atribuída a idade de 1 ano para o ano de 1986 e as demais idades a partir desse ano. Informações adicionais sobre o conjunto de dados disponíveis na plataforma GitHub: [https://github.com/celsohlsj/gee\\_brazil\\_sv](https://github.com/celsohlsj/gee_brazil_sv).

Os dados possuem resolução espacial de 30 m e a série histórica está ligada à série disponível pelo MapBiomas. Nesse estudo, foram utilizados os dados para o período de 1986 a 2020.

#### **4.2.3 Precipitação**

Os dados de precipitação foram obtidos a partir do conjunto de dados *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data* (CHIRPS) versão 2.0, que abrange um período de mais de 40 anos (1981 a presente). A série de dados integra imagens de satélite com dados de estação *in-situ* que possibilita análises de tendência e monitoramento de seca sazonal (FUNK *et al.*, 2015).

O CHIRPS possui resolução espacial de  $0,05^\circ$  (~5 km) e resolução temporal diária ( $\text{mm.d}^{-1}$ ) com cobertura quase global, variando de  $50^\circ\text{S}$  a  $50^\circ\text{N}$  e  $180^\circ\text{W}$  a  $180^\circ\text{E}$ . Com o intuito de abranger e igualar a série histórica da Coleção 6 da base de dados de floresta, foram utilizadas as informações para o período entre 1988 e 2018.

Esse conjunto de dados se destaca entre outras bases de dados de precipitação pois possui elevada resolução espacial, série histórica abrangente e é validado para todo Brasil (COSTA *et al.*, 2019). No entanto, uma das limitações desse conjunto de dados é a subestimação da precipitação nos meses mais chuvosos na região Amazônica (CAVALCANTE *et al.*, 2020). Porém, isso não afeta significativamente os resultados, pois as análises foram realizadas na escala temporal anual e passaram por uma remoção de fatores de localização (influenciam nos regimes sazonais) e larga escala (influenciam nos regimes interanuais). Informações complementares sobre os dados podem ser encontradas em: <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>.

#### **4.2.4 Temperatura**

Foram utilizados os dados de temperatura da superfície terrestre diária obtidos pelos sensores MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), que estão a bordo dos satélites Terra e Aqua, lançados em dezembro de 1999 e maio de 2002, respectivamente. Esse produto foi escolhido por apresentar uma estabilidade de longo prazo, com correções adequadas para sua utilização em séries temporais e resolução espacial satisfatória para este estudo.

O MODIS dispõe de 36 bandas espectrais com diferentes resoluções espaciais com comprimentos de onda que variam de  $0,4 \mu\text{m}$  a  $14,4 \mu\text{m}$ . Além desses dados brutos, são fornecidos outros produtos processados como temperatura da superfície terrestre (LST), ângulo zenital da observação do dia, hora local da observação diurna e noturna e emissividade.

Nesse estudo foram utilizados os dados de LST diária e noturna dos produtos MOD11A1 (satélite Terra) e MYD11A1 (satélite Aqua) versão 6.1, com resolução espacial de 1 km e temporal diária. Os horários de passagem dos satélites sobre o Equador são diferentes, o Terra passa diariamente por volta das 10h30min e 22h30min, enquanto o Aqua passa por volta das 13h30min e 1h30min.

O cálculo da LST é realizado através das bandas térmicas infravermelha de onda curta (SWIR - *Shortwave Infrared*) e infravermelha de onda média (MWIR - *Midwave Infrared*), que são sensíveis à radiação térmica emitida pela superfície da Terra, permitindo estimar a temperatura da superfície. Os dados foram obtidos na plataforma AppEEARS (<https://appears.earthdatacloud.nasa.gov/>).

#### **4.2.5 Evapotranspiração (ET)**

Para analisar a evapotranspiração, foram utilizados os produtos de evapotranspiração dos MODIS, MOD16A2GF (satélite Terra) e MYD16A2GF (satélite Aqua) versão 6.1 que possuem correção das entradas de baixa qualidade do Índice de Área Foliar e da Fração de Radiação Fotossinteticamente Ativa (LAI/FPAR) para cada pixel. E, caso algum pixel LAI/FPAR não atenda aos critérios de triagem de qualidade, o valor é determinado por interpolação linear.

O algoritmo usado para gerar os produtos é baseado na lógica da equação de *Penman-Monteith*, que inclui entradas de dados de reanálise meteorológica diária juntamente com produtos MODIS (RUNNING *et al.*, 2019), como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar incidente.

Dentre as informações fornecidas pelos conjuntos de dados, foi utilizada apenas a Evapotranspiração Total – ET ( $\text{kg/m}^2/8$  dias), que possui resolução espacial de 500 m e temporal de 8 dias. É importante ressaltar que os valores do pixel para a camada de interesse são a soma de todos os oito dias, ou seja, se um pixel possui valor igual a  $32 \text{ kg/m}^2/8$  dias, significa que ocorreu uma evapotranspiração total média de 4 mm/dia.

A extensão temporal é um fator que difere o MOD16A2GF do MYD16A2GF. O primeiro cobre o período de 2000 até o presente e o segundo tem início em 2002 até o presente. Nesse estudo, foram utilizados os dados de 2001 a 2018, a fim de padronizar o ano inicial utilizado para a variável temperatura e o ano de término dos dados de floresta, além de buscar abranger a maior série temporal possível de observações.

Informações complementares sobre os dados MOD16A2GF podem ser encontradas em: <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a2gfv061/> e sobre o MYD16A2GF em: <https://lpdaac.usgs.gov/products/myd16a2gfv061/>. Os dados foram obtidos na plataforma AppEEARS (<https://appears.earthdatacloud.nasa.gov/>).

#### **4.2.6 Elevação**

Com relação à elevação, foram utilizados os dados da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) versão 3.0, propiciada pela colaboração entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA), além da participação de agências espaciais alemã e italiana. Por meio dessa parceria, foi possível obter informações para gerar um modelo digital de elevação quase global, na resolução de aproximadamente 30 m, utilizando interferometria de radar (FARR *et al.*, 2007).

O SRTM V3 tem como principal objetivo eliminar lacunas que estavam presentes nas versões anteriores e tem como referência o ano 2000 e cobertura espacial entre 60° N e 56° S de latitude, e 180° E e 180° W de longitude. Em áreas com informações altimétricas limitadas, foram usados dados topográficos para complementar e preencher os vazios do SRTM utilizando dados de código aberto.

Para validação do SRTM, os pesquisadores utilizaram o método de posicionamento geodésico cinemático, por meio de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Basicamente, foram coletadas as linhas quilométricas de posições percorridas por um veículo em movimento com um receptor GNSS acoplado, e, então, estas linhas foram usadas para modelar as fontes de erro. Maiores informações sobre o SRTM V3 podem ser encontradas em: [https://cmr.earthdata.nasa.gov/search/concepts/C1000000240-LPDAAC\\_ECS.html](https://cmr.earthdata.nasa.gov/search/concepts/C1000000240-LPDAAC_ECS.html).

### **4.3 Tratamento dos dados**

#### **4.3.1 Floresta Primária e Floresta Secundária**

Com o objetivo de padronizar a resolução espacial dos dados, as informações de FP e FS, originalmente com pixels de 30 m, foram reamostradas para aproximadamente 5 km (resolução do CHIRPS). No entanto, ao realizar a extração das informações pixel a pixel, verificou-se que a quantidade de pixels FS nesta resolução não seria suficiente para descrever o comportamento das variáveis climáticas em função da cobertura da FS.

Como a FS é geralmente fragmentada, ocupando extensões espaciais menores quando comparada com a FP, a resolução de ~5 km é considerada grosseira e pode gerar perdas de informações relevantes. Diante disso, foi necessário reamostrar os dados para uma resolução maior, buscando equilíbrio entre o aumento da quantidade de observações de FS e não degradar espacialmente o dado de chuva.

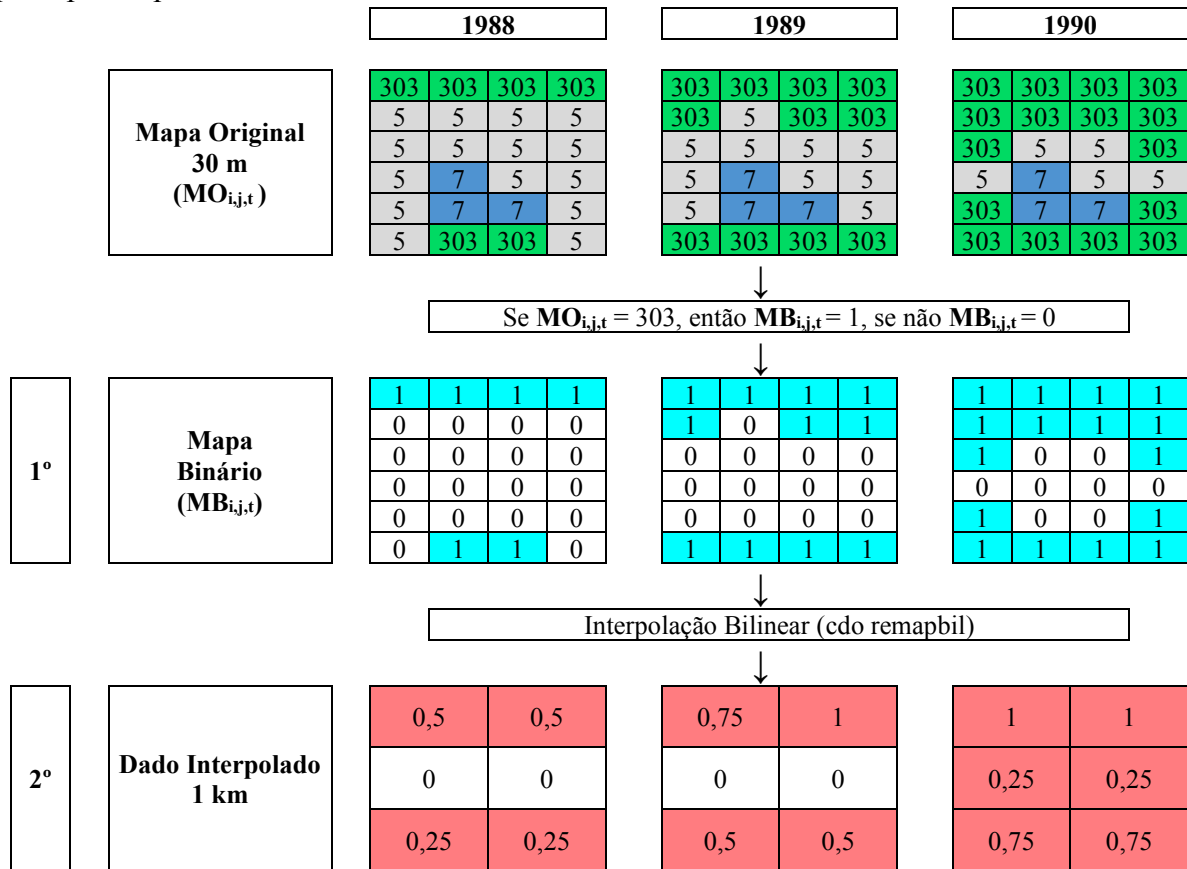
Por meio de análises empíricas, a resolução espacial de 1 km proporcionou esse equilíbrio e foi escolhida para reamostragem. Assim, foram alocados, aproximadamente 1112 pixels de 30 m dentro de cada pixel de 1 km. Para realizar esse procedimento, primeiramente foram criados mapas binários, atribuindo o valor 1 aos pixels que contém o ID da categoria de interesse (203 - FP e 303 - FS) dos dados do Método do Desmatamento e 0 para os pixels das demais classes.

A partir dos mapas binários, realizou-se a reamostragem utilizando um método de redução de resolução (*reduceResolution*) implementado no *Google Earth Engine* (GEE), que agrega pixels menores em pixels maiores. Com o intuito de obter a fração de área ocupada pela classe de interesse dentro do pixel de 1 km, foi utilizado como redutor a média aritmética. Durante a reamostragem, os dados também foram interpolados para a grade dos produtos MODIS, na resolução de 1 km.

A Figura 2 representa uma simulação desses passos para os anos 1988, 1989 e 1990, onde as células simbolizam os pixels. No primeiro passo, os mapas originais são convertidos em binários. Neste exemplo, os pixels de valor 5 e 7 classificados como uso antrópico e corpo d'água, respectivamente, recebem o valor 0, enquanto os pixels de FP (203) recebem o valor 1. No segundo passo, a nível de demonstração, foi considerado que 1 pixel de 1 km equivale a 4 pixels de 30 m. Assim, realizou-se o cálculo da fração de área somando os valores dos 4 pixels e dividindo por 4 (média aritmética).

Todos esses procedimentos foram realizados no GEE.

**Figura 2.** Representação da metodologia utilizada para obtenção da fração de área de FS por pixel para o período entre 1988 a 2018.



Fonte: Autora

#### 4.3.2 Precipitação, Evapotranspiração, Temperatura e Elevação

Os dados de precipitação do CHIRPS foram adquiridos na plataforma *Climate Hazards Center – University of California* (UC) (<https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>). Com base na demanda descrita no tópico 3.3.1, os arquivos que originalmente possuíam resolução espacial de ~5 km, foram reamostrados para 1 km utilizando o método de interpolação bilinear. Essa interpolação foi realizada através do comando “cdo remapbil” do *Climate Data Operators* (CDO).

Como a resolução temporal dos dados de floresta é anual e a do CHIRPS é diária, foi necessário realizar a conversão dos dados diários para anual. Para isso, foi calculada a soma anual da precipitação através do comando “cdo yearsum” do CDO.

Para aquisição dos dados de evapotranspiração foi utilizada a plataforma AppEEARS. Os dados originais na resolução espacial de 500 m foram convertidos para 1 km utilizando o método de interpolação bilinear por meio do CDO e, para obter a evapotranspiração total anual média, realizou-se a soma dos *times* de cada ano (cada *time* representa a evapotranspiração de 8 dias) para cada satélite MODIS.

Como a aquisição das informações pelos satélites é realizada em horários diferentes, com o objetivo de obter um valor médio da evapotranspiração, foi calculada a média aritmética da combinação entre as duas observações dos produtos (MOD16A2GF e MYD16A2GF). No entanto, para o ano 2001 foi utilizado apenas a evapotranspiração do MOD16A2GF, pois o MYD16A2GF possui dados apenas a partir de 2002.

Os dados de LST também foram obtidos na plataforma AppEEARS, com unidade em Kelvin, resolução espacial de 1 km e temporal diária. Primeiramente, os dados foram convertidos para resolução temporal anual utilizando o comando “cdo timmean”, que calcula a média temporal para cada pixel, resultando na temperatura média anual.

Embora os pixels originais sejam de 1 km, foi necessário interpolar os dados de temperatura da superfície para a grade de referência (MODIS). Para isso, foi utilizado o comando “cdo remaplaf” do CDO, que mantém o valor que ocupa a maior área dentro do pixel. Posteriormente, os dados foram convertidos para Celsius.

Assim como para os dados de ET, para a LST foi calculada a média aritmética da combinação entre os dois produtos (MOD16A2GF e MYD16A2GF). No entanto, no caso da LST, cada satélite fornece duas observações diárias (LST diurna e LST noturna).

Dessa forma, a LST resultante foi obtida pela média de quatro observações de LST. Como a série temporal do MOD11A1 começa em fevereiro de 2000 e a do MYD11A1 em julho de 2002, essa média com quatro observações foi calculada para o período entre 2003 e 2018. Para análise dos anos 2001 e 2002 foi calculada a média da LST diurna e noturna do MOD11A.

Os dados de elevação, com resolução inicial de aproximadamente 30 m, foram adquiridos e reamostrados para 1km utilizando o método de interpolação bilinear na plataforma do GEE.

Por fim, para realizar as análises, todos os dados foram recortados para cada região de interesse. Todas as manipulações dos dados adquiridos em suas respectivas plataformas foram realizadas através de scripts elaborados na *NCAR Command Language* (NCL) e executados no terminal Ubuntu.

## **4.4 Métodos e Análises**

### **4.4.1 Cálculo da Anomalia Residual da Precipitação Anual (ARPA)**

Ao longo da extensão das regiões CBA, EBA e SBA existe uma alta variabilidade interanual de precipitação (Apêndice A1), que pode ser causada por diferentes fatores, dentre eles, a posição geográfica (latitude, longitude e elevação), fatores de larga escala (ENSO) e o LULC.

Com o objetivo de obter a anomalia residual da precipitação anual (ARPA) em função da área ocupada pela de FP e FS, foi utilizada a metodologia empregada por Leite-Filho *et al.* (2021) para calcular por meio de três etapas.

Na etapa 1, foi estimado o padrão espacial da precipitação anual para cada região. Para isso, primeiramente, foi verificado qual modelo de regressão seria mais adequado para modelar a climatologia da precipitação no período de análise. Essa climatologia foi obtida a partir do cálculo da média temporal (“cdo timmean”) dos dados de soma anual de precipitação utilizando um *script* na NCL. O Apêndice A2 apresenta a distribuição espacial da climatologia, da precipitação estimada pelo modelo polinomial de terceiro grau e da diferença entre elas.

No *software R* foi criado um *script* para extrair as informações pixel a pixel da precipitação e da elevação. Com essas informações, ainda nesse *software*, foram testados os modelos de regressão linear e polinomial de grau 2, 3, 4 5 e gerou-se para cada região de análise os estimadores das variáveis da latitude, da longitude e da altitude para cada modelo, com seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), intervalos de confiança (IC - 95%) e P-valor.

Com base nos resultados dos  $R^2$  obtidos para cada modelo (Apêndice A3), foi escolhido o modelo polinomial de terceiro grau para calcular os valores estimados de precipitação de acordo com a localização geográfica e altitude de cada ponto. Dessa forma, as Equações 1, 2 e 3 foram utilizadas para realizar esse cálculo para as regiões CBA, EBA e SBA, respectivamente.

$$\hat{P}_{i,j_{CBA}} = -460159.0600 + (-95.4214\varphi) + (-21.5520\varphi^2) + (-0.6570\varphi^3) + (-23158.0283\lambda) + (-386.6818\lambda^2) + (-2.1529\lambda^3) + (1.2090\zeta) + (-0,0024\zeta^2) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\hat{P}_{i,j_{EBA}} = -72764.6390 + (99.2244\varphi) + (14.3132\varphi^2) + (1.2293\varphi^3) + (-3458.9782\lambda) + (-48.1005\lambda^2) + (-0.1830\lambda^3) + (-3.2183\zeta) + (0.0059\zeta^2) \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\hat{P}_{i,j_{SBA}} = -73682.5054 + (717.7665\varphi) + (64.3641\varphi^2) + (2.1599\varphi^3) + (-3809.8874\lambda) + (-60.9539\lambda^2) + (-0.3224\lambda^3) + (-0.7296\zeta) + (0,0021\zeta^2) \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que:

$\hat{P}$  : valores estimados de precipitação devido à localização geográfica e altitude;

$i, j$ : subscritos que representam as dimensões do espaço ( $i, j$ );

$\varphi, \lambda$  e  $\zeta$ : latitude (graus), longitude (graus) e elevação (metros).

Na etapa 2, foi removida a tendência climatológica relacionada à localização geográfica e elevação. Para isso, foi calculada a diferença entre os valores brutos da precipitação total observada em cada ano e os valores estimados devido à posição geográfica a partir da Equação 4.

$$P_{i,j,t}^* = (P_{i,j,t} - \hat{P}_{i,j}) \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

$P^*$ : diferença entre os valores de precipitação anual observados e os estimados devido à localização geográfica e elevação

$P$ : valores de precipitação anuais ( $\text{mm.ano}^{-1}$ );

$t$ : subscrito que representa a dimensão do tempo (ano)

Por fim, na etapa 3, foi removido o sinal de fatores de grande escala, como por exemplo, ENOS. Esse procedimento foi realizado a partir do cálculo da diferença entre o resultado obtido na Equação 4 ( $P^*$ ) e a precipitação média anual para toda extensão de cada região de estudo, como mostra a Equação 5.

$$P'_{i,j,t} = (P_{i,j,t}^* - \bar{P}_t) \quad (\text{Eq. 5})$$

Sendo:

$P'$ : anomalias residuais de precipitação anual ( $\text{mm.ano}^{-1}$ );

$\bar{P}$ : médias anuais de precipitação calculada para toda a região.

Após essas etapas foi possível obter o “resíduo” da precipitação que é considerado uma “anomalia” que pode ser atribuída ao LULC, pois não é explicada pela localização geográfica, elevação ou fatores de larga escala, que podem influenciar no padrão espaço-temporal das chuvas.

#### ***4.4.2 Análise da ARPA, evapotranspiração e temperatura em função dos anos e da extensão da FP e FS***

Para analisar o comportamento da ARPA, da ET e da LST ao longo dos anos e ajustar regressões lineares ou polinomiais que expressem essas variáveis em função da porcentagem de área de FP e FS, foram extraídas informações pixel a pixel de cada variável climática em relação à cobertura (porcentagem de área) de FP e FS em cada célula para cada região e ano do período entre 1988 e 2018. Essa extração foi realizada no software R.

Por exemplo, no caso da extração das informações da ARPA em função da cobertura de FS, cada linha das planilhas geradas continham os valores da ARPA e porcentagem para um pixel. Caso não houvesse informações no pixel, era retornado “NA” (ausência de informação). Posteriormente, unificou-se as planilhas de cada ano para cada região a fim de obter todas as informações para todo o período de análise.

Como a quantidade de observações obtidas foram da ordem de até  $10^6$  (Apêndice A4), com variações entre as regiões, foram calculados valores médios das variáveis climáticas, com seus respectivos erros-padrão (EP). Isso foi realizado para cada tipo de análise desejada: por ano e por cobertura de FP e FS.

A análise por porcentagem de área coberta com FP e FS foi realizada através do cálculo da média de todas as observações a cada intervalo de 5% da área do pixel com essas coberturas. Os dados foram filtrados para esses intervalos e, posteriormente, calculou-se a média e o EP (Equação 6) de cada intervalo.

O cálculo do EP foi realizado para avaliar a confiabilidade da média calculada e, posteriormente, definir o intervalo de confiança (IC) das observações. Como os dados apresentam distribuição normal ou aproximadamente normal, os limites superior e inferior do IC foram obtidos pela soma e diferença entre a média e os EP, respectivamente.

$$EP = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

$\sigma$ : desvio padrão amostral;

$n$ : tamanho amostral

$$IC = \begin{cases} \text{Limite Superior} \\ \text{Limite Inferior} \end{cases} = \begin{cases} (\bar{x} + EP) \\ (\bar{x} - EP) \end{cases} \quad (\text{Eq. 7})$$

Sendo:

EP: erro-padrão;

$\bar{x}$ : média

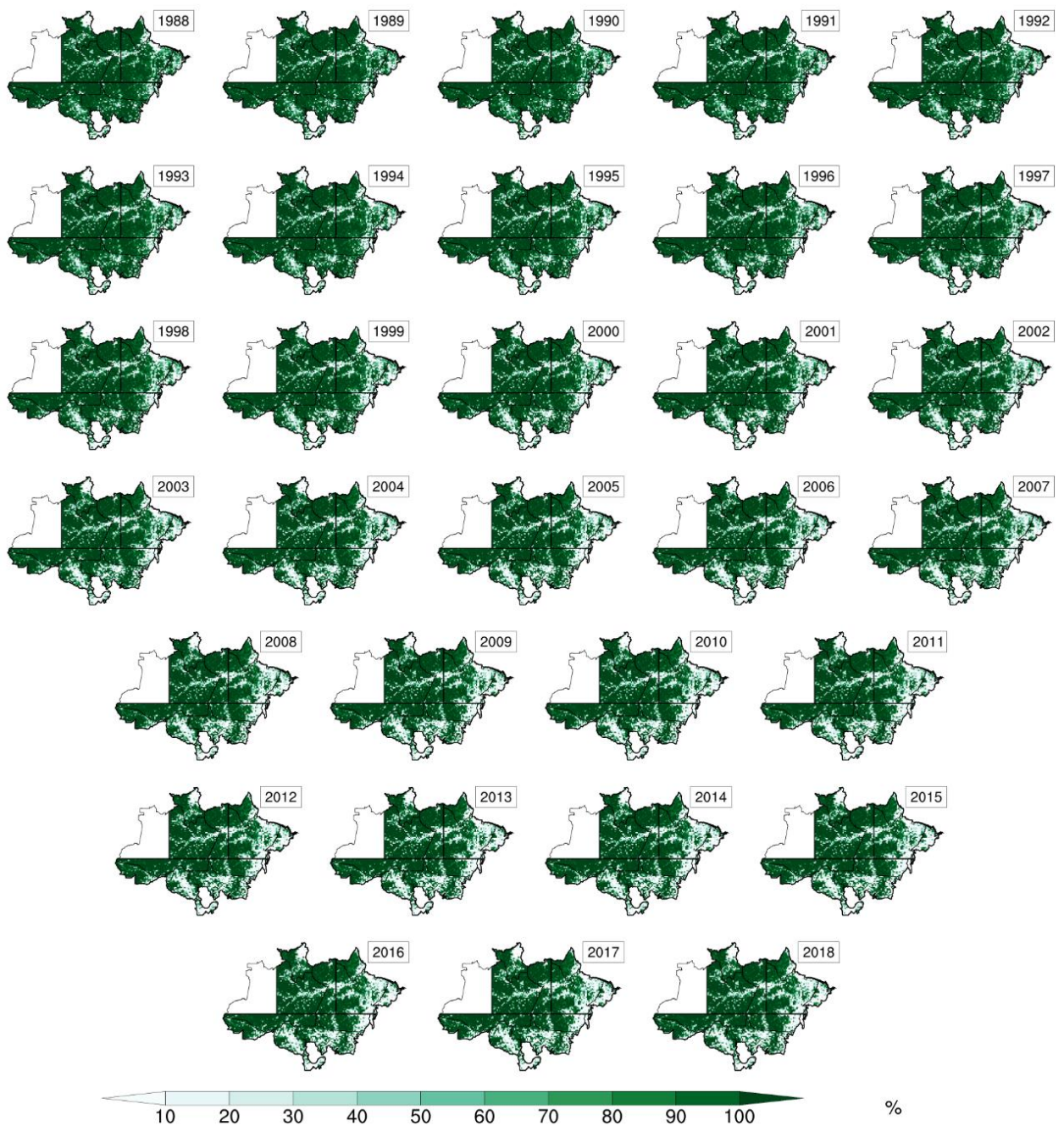
Com os resultados obtidos por meio desses cálculos, elaborou-se gráficos de dispersão para visualizar e interpretar como as variáveis se relacionam. Além disso, foram geradas equações de regressão que modelam as respostas das variáveis climáticas em função da porcentagem de área ocupada pela FP e FS para cada região.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Distribuição espacial da FP e da FS e da idade da FS

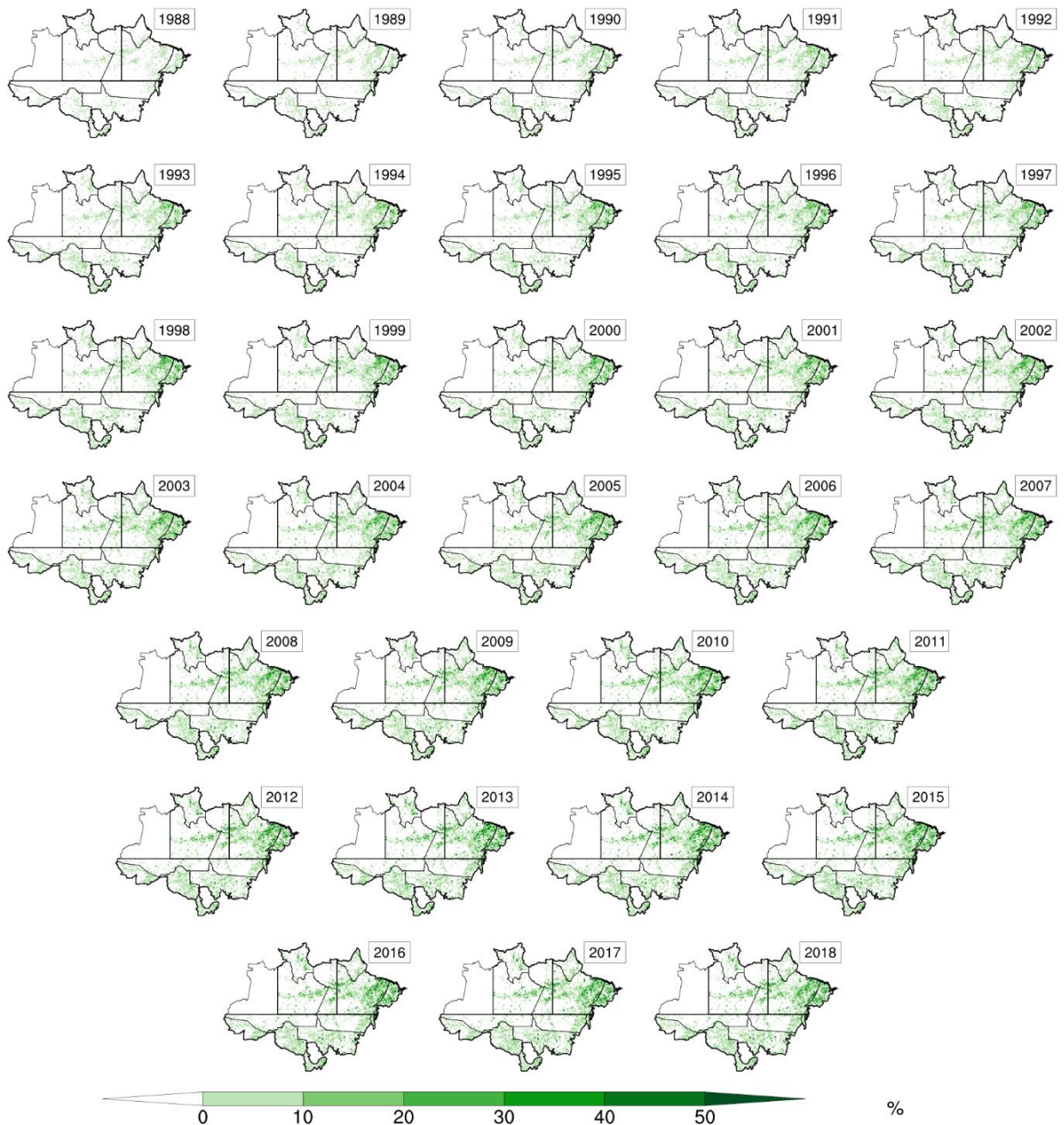
No período entre 1988 e 2018, todas as regiões de análise apresentaram perdas de FP (Figura 3). Entretanto, é possível observar que na região CBA essas perdas foram menos expressivas, comparado às regiões EBA e SBA. Na CBA, observa-se perdas dispostas ao longo das margens do Rio Amazonas, enquanto na EBA e na SBA são concentradas na parte leste e sul, respectivamente, que fazem fronteira com o Cerrado.

**Figura 3.** Distribuição espacial da cobertura correspondente à FP nas regiões CBA, EBA e SBA para o período de 1988 a 2018.



Com relação à distribuição espacial da FS, a Figura 4 mostra o aumento da área ocupada por essa cobertura ao longo dos anos em todas as regiões. A região EBA se destaca em relação à CBA e SBA por apresentar maior quantidade de pixels (Tabela 3 do Apêndice A4) com maiores porcentagens de cobertura e áreas agregadas. Entretanto, a área de ocupação de FS ao longo dos anos não se iguala com a área de perda de FP apresentada na Figura 3, indicando que outro tipo LULC passou a ocupar essas áreas.

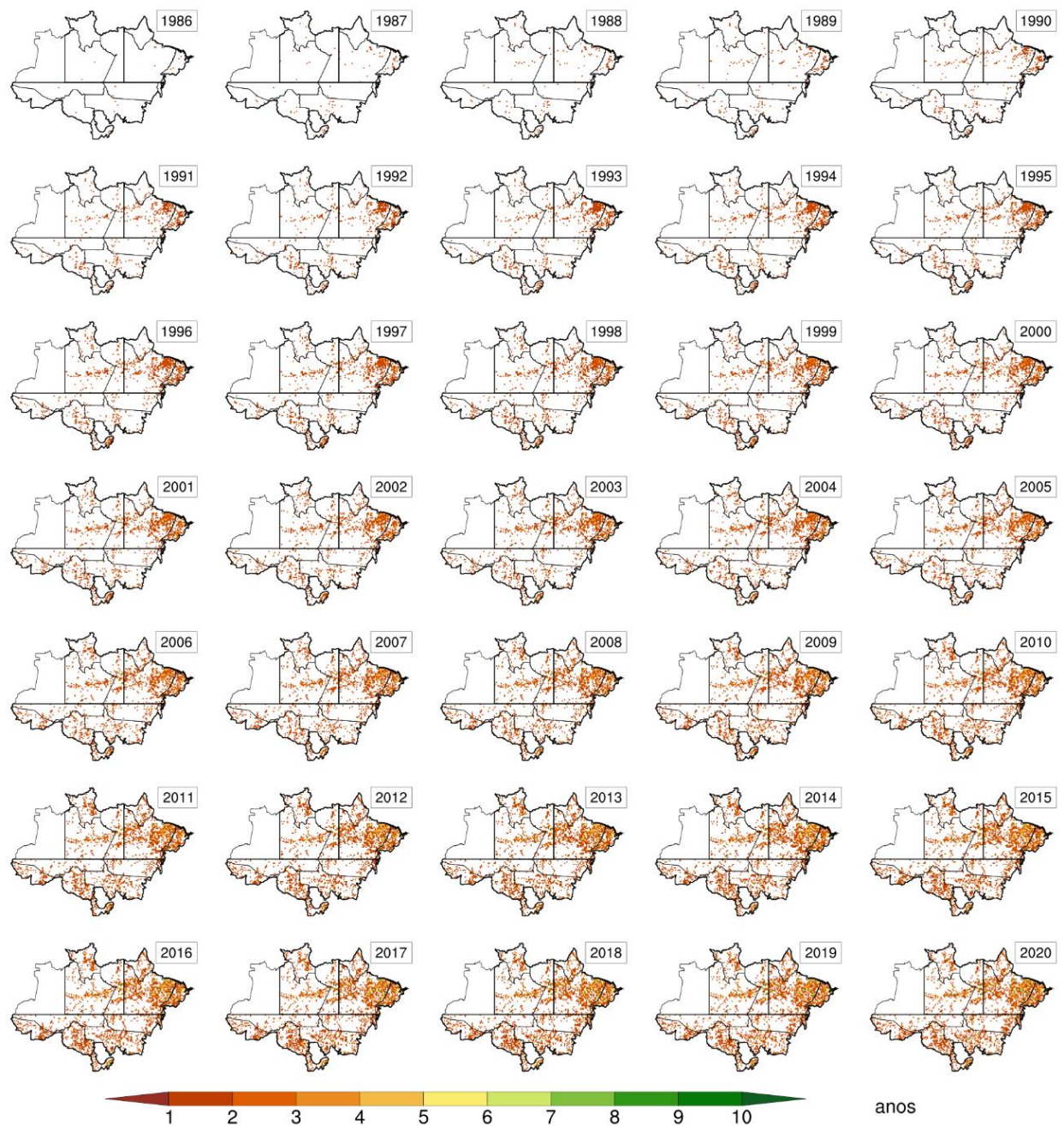
**Figura 4.** Distribuição espacial da cobertura de FS nas regiões CBA, EBA e SBA para o período de 1988 a 2018.



Fonte: Autora

A Figura 5 exibe a distribuição espacial da idade da FS ao longo dos anos para o período entre 1986 e 2020 e a Figura 17 no Apêndice A5 apresenta a distribuição de frequências da idade. A partir dessas figuras é possível notar que existem pouquíssimos pixels com idades iguais ou maiores que 10 anos e que, em geral, a maior parte das coberturas de FS tem idade entre 2 e 6 anos. Além disso, a EBA mais uma vez se destaca em relação as demais regiões, indicando FS com idades maiores.

**Figura 5.** Distribuição espacial da idade da FS nas regiões CBA, EBA e SBA para o período de 1986 a 2020.



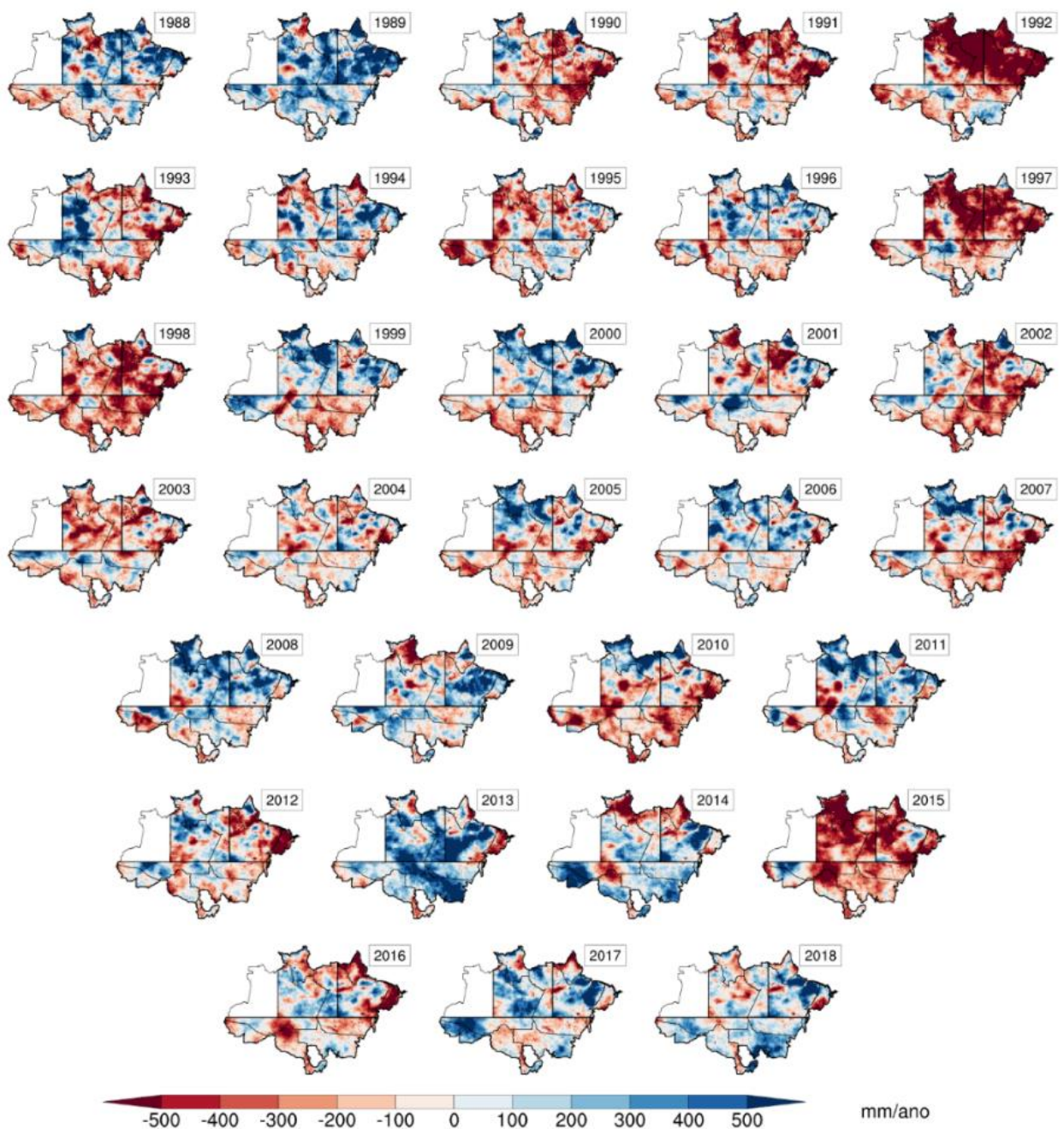
Fonte: Silva Júnior *et al.*, (2020)

## 5.2 Análises Anuais

### 5.2.1 Anomalias residuais de precipitação anual (ARPA) nas regiões CBA, EBA e SBA

A Figura 6 apresenta a distribuição espacial das ARPA nas regiões de análise para o período entre 1988 e 2018. É possível observar que, para um mesmo ano, o comportamento espacial das ARPA são distintos entre as regiões. Considerando que os efeitos de localização e de larga escala foram completamente removidos, é possível afirmar que os diferentes tipos de LULC de cada região podem provocar respostas divergentes nas ARPA.

**Figura 6.** Distribuição espacial das ARPA nas regiões CBA, EBA e SBA para o período de 1988 a 2018.

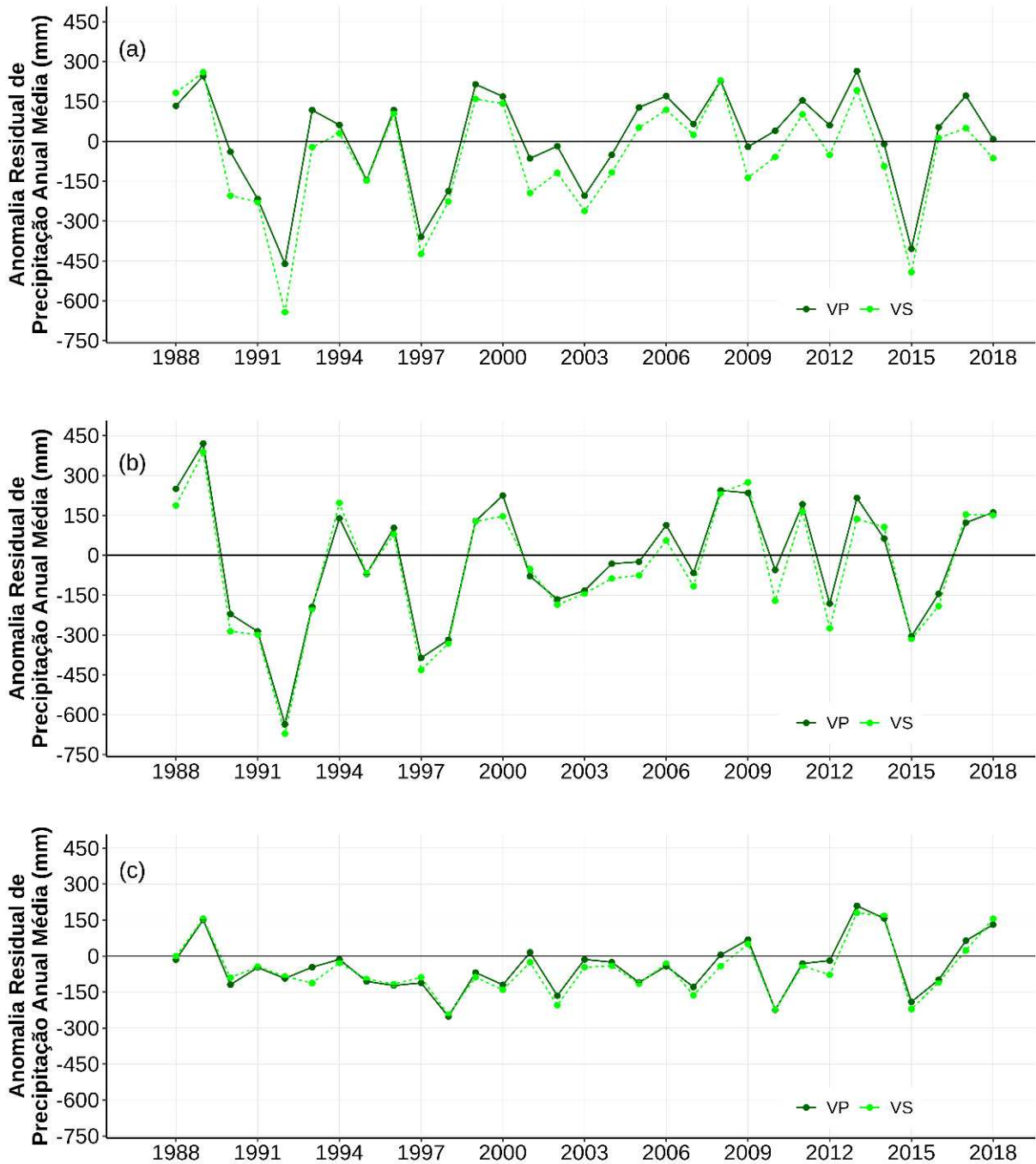


Fonte: Autora

No entanto, fica evidente que nos anos com eventos de El Niño (e.g. 1991-1992, 1997-1998, 2002-2003, 2015-2016) e La Niña (e.g. 1999-2000, 2007-2008 e 2010-2011) as variações das anomalias foram maiores, indicando que os efeitos de larga escala não foram completamente removidos. As regiões CBA e EBA, por exemplo, nos anos de El Niño apresentaram ARPA negativas (redução da chuva) acima de 500 mm, enquanto, em quase toda extensão da SBA, não ultrapassou os 200 mm. Já nos anos de La Niña, esse comportamento é invertido.

Na Figura 7, são apresentadas as ARPA médias para cada ano e região nas coberturas de FP e FS, possibilitando a comparação das suas influências na ARPA. Assim como observado na distribuição espacial (Figura 6), as ARPA médias das regiões CBA e EBA atingem valores extremos maiores, provocando variações mais expressivas ao longo dos anos, quando comparadas com a SBA.

**Figura 7.** ARPA médias para o período entre 1988 e 2018 nas regiões (a) CBA, (b) EBA e (c) SBA.



Fonte: Autora

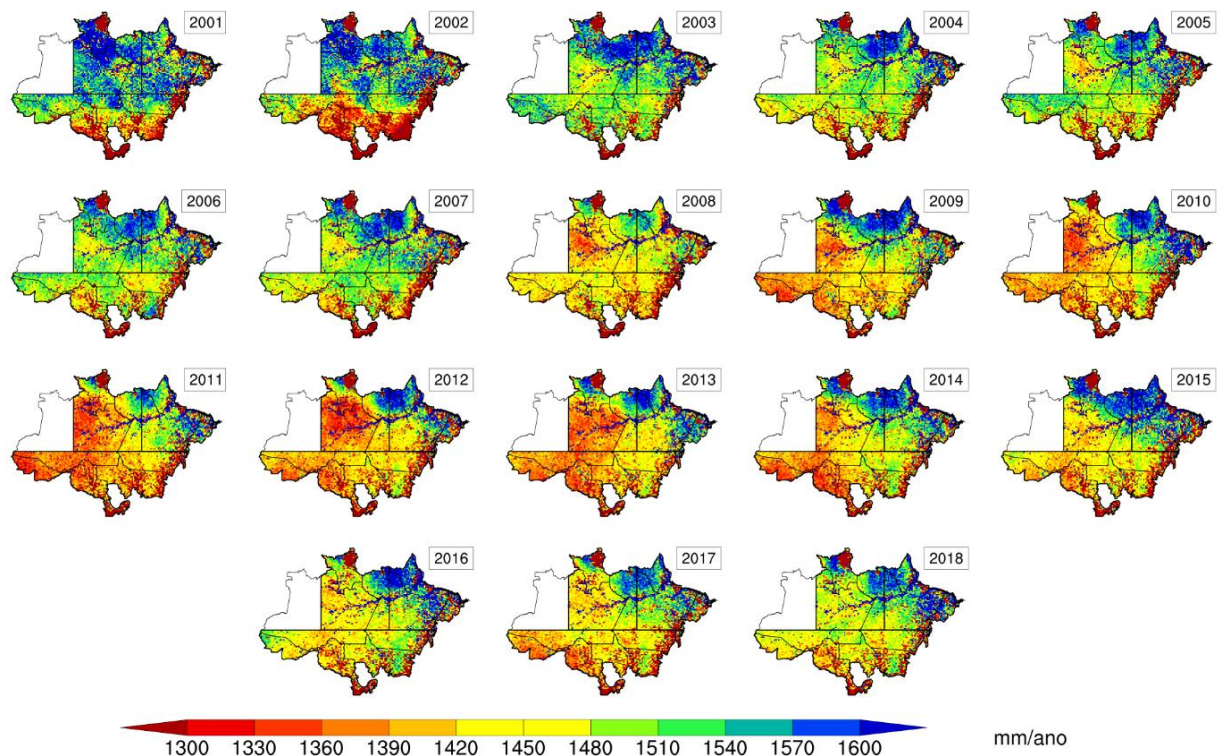
A SBA, por exemplo, só apresentou uma variação acima de 300 mm entre o ano de 2014 e 2015 (ocorrência de El Niño), enquanto que a CBA e a EBA apresentaram variações superiores a essa nos anos de 1992-1993, 1998-1999 e 2015-2016 (anos com ocorrência de El Niño ou La Niña). Além disso, a diferença das ARPA médias entre as coberturas também difere de região para região.

Começando pela CBA, são observadas variações mais acentuadas (até aproximadamente 150 mm) em diversos anos, seguindo para EBA com diferenças de no máximo 100 mm, em um número menor de anos e, por último, a SBA com variações ligeiramente baixas, próximas a 70 mm. Curiosamente, a SBA se mantém com ARPA médias abaixo de zero desde 1990 até 2000 e de 2002 a 2007.

### 5.2.2 *Evapotranspiração total anual nas regiões CBA, EBA e SBA*

A Figura 8 apresenta a disposição espacial da ET anual para o período entre 2001 e 2018, onde nota-se que existe uma alta variabilidade interanual, principalmente na CBA, variando entre 1300 e 1600 mm. NA EBA, na maior parte dos anos, observa-se uma ET com valores acima de 1480 mm em quase toda sua extensão, com exceção da parte sudoeste que apresenta valores inferiores, principalmente a partir de 2008. Já na SBA, a ET é inferior a 1540 mm na maior parte da região para todos os anos de análise.

**Figura 8.** Distribuição espacial da evapotranspiração nas regiões CBA, EBA e SBA para o período de 2001 a 2018.



Fonte: Autora

Por meio da Figura 9, é possível analisar separadamente a ET total média de cada ano para as coberturas de FP e FS. Na maioria dos anos, nas três regiões, a FS apresenta uma ET inferior a FP, ou seja, nesses anos a FP converteu mais energia na forma de calor latente (ET)

do que a FS. Na SBA, isso ocorre em todos os anos, enquanto na CBA, nos anos de 2010 e 2011, e na EBA, em 2013, a ET total média da FS foi superior à da FP.

**Figura 9.** Evapotranspiração total anual média para o período entre 2001 e 2018 nas regiões (a) CBA, (b) EBA e (c) SBA.

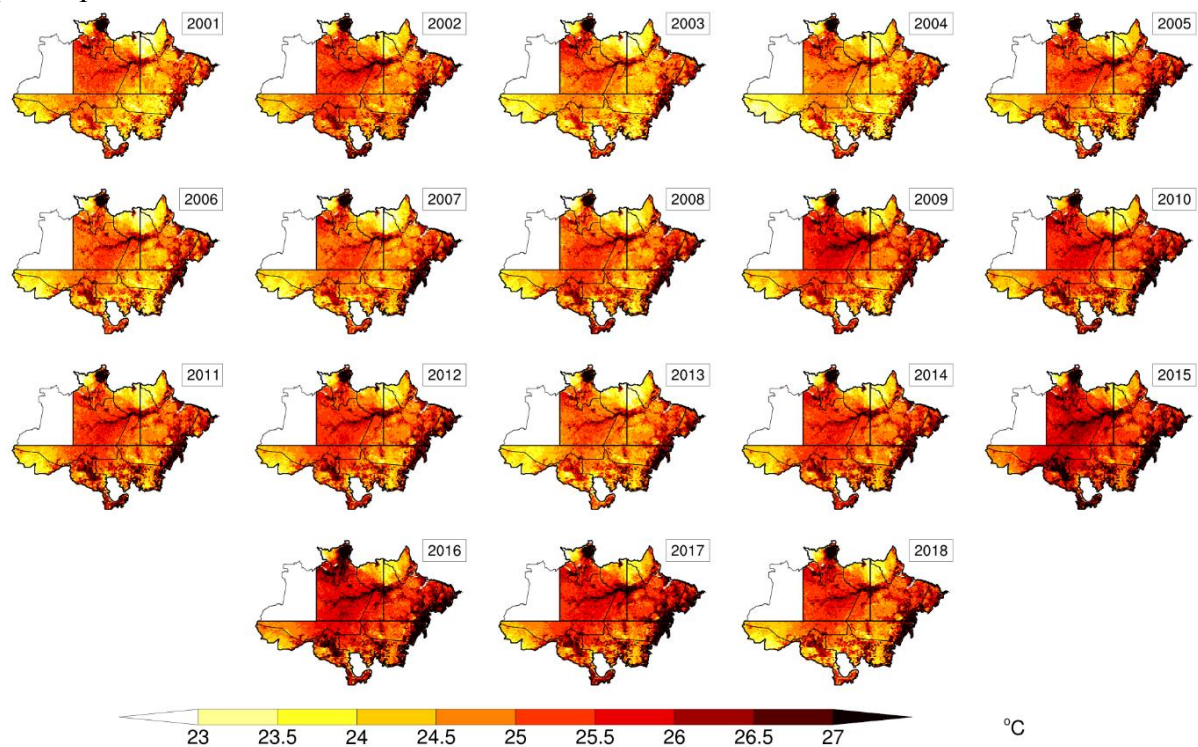


Fonte: Autora

### 5.2.3 Temperatura média anual nas regiões CBA, EBA e SBA

A Figura 10 mostra a distribuição espacial da temperatura média anual da superfície nas regiões de estudo para o período entre 2001 e 2018. Visualmente, observa-se uma tendência crescente ao longo dos anos que pode ser influenciada, principalmente, pelas mudanças climáticas (NOAA, 2022). À medida que ocorre o acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera devido a atividades antropogênicas, a radiação de ondas longas que é emitida pela superfície é retida por esses gases, aquecendo a atmosfera e a superfície (MANABE, 2019; NOAA, 2022).

**Figura 10.** Distribuição espacial da temperatura da superfície nas regiões CBA, EBA e SBA para o período de 2001 a 2018.



Fonte: Autora

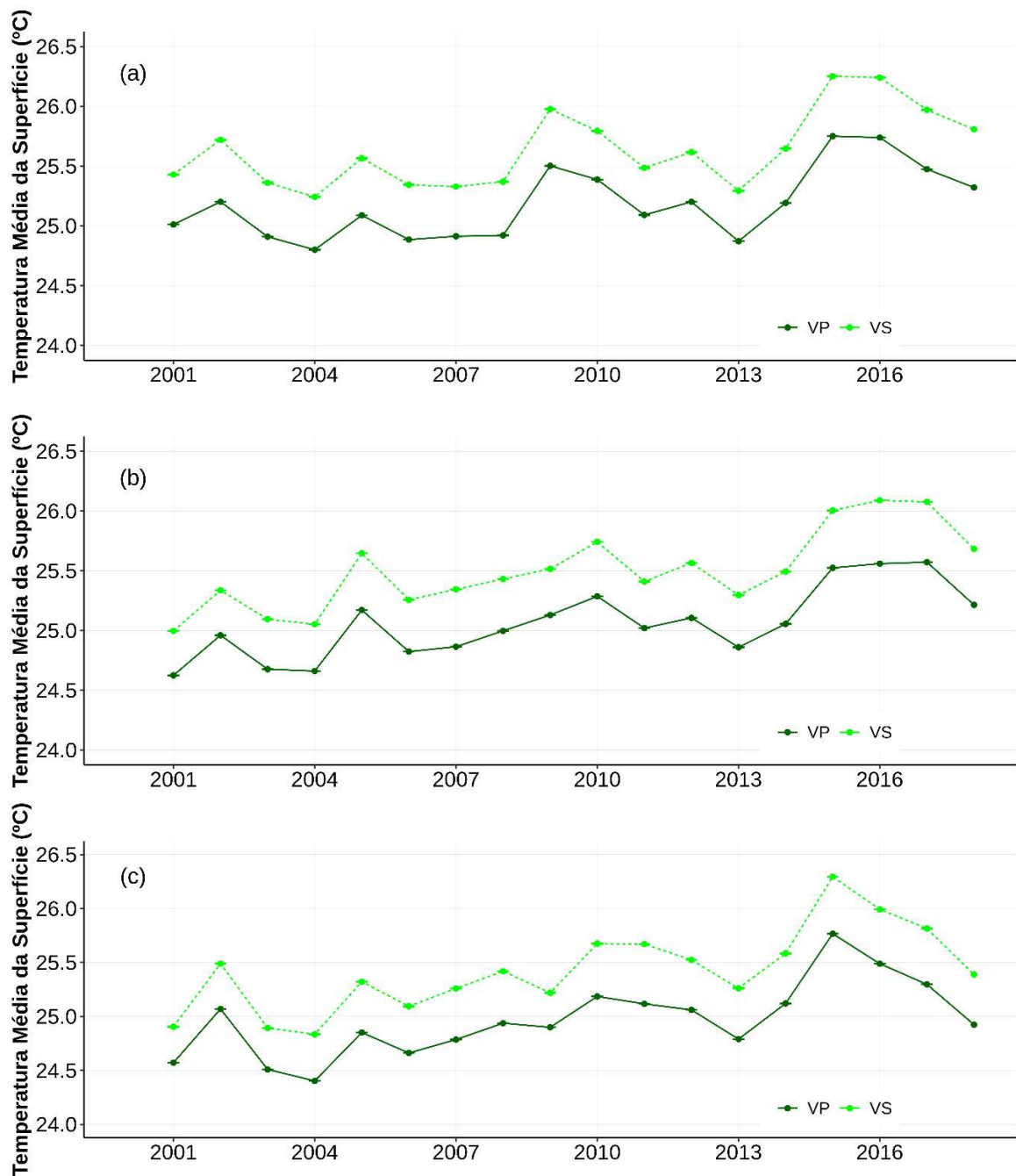
Nos anos de 2015-2016 (ocorrência de El Niño) e 2007-2008 e 2010-2011 (ocorrência de La Niña) é notório que as temperaturas são mais elevadas e mais amenas, respectivamente. Os efeitos causados por esses eventos na superfície estão relacionados aos períodos secos (chuvosos) que acarretam em baixa (alta) disponibilidade de água, que resultam no aquecimento (resfriamento) da superfície.

Nesse contexto, assim como a ET, a temperatura da superfície contribui efetivamente para o balanço de energia, convertendo energia na forma de calor sensível (aumento da LST). A radiação solar incidente é a principal fonte de energia que chega à superfície, entretanto, a capacidade de armazenamento dessa energia no sistema é determinada pelo tipo de cobertura,

variando com o coeficiente de refletividade (albedo), que é função da coloração e da rugosidade (GIONGO *et al.*, 2009; LABARRE *et al.*, 2019).

A Figura 11 mostra que, em quase todos os anos, a superfície coberta com FS apresenta uma diferença de temperatura de aproximadamente 0,5 °C em relação à coberta com FP nas três regiões. Esse comportamento mostra que a FS consegue armazenar uma menor quantidade de energia comparada à FP, provocando o aumento do fluxo de calor sensível.

**Figura 11.** Temperatura média anual da superfície para o período entre 2001 e 2018 nas regiões (a) CBA, (b) EBA e (c) SBA.



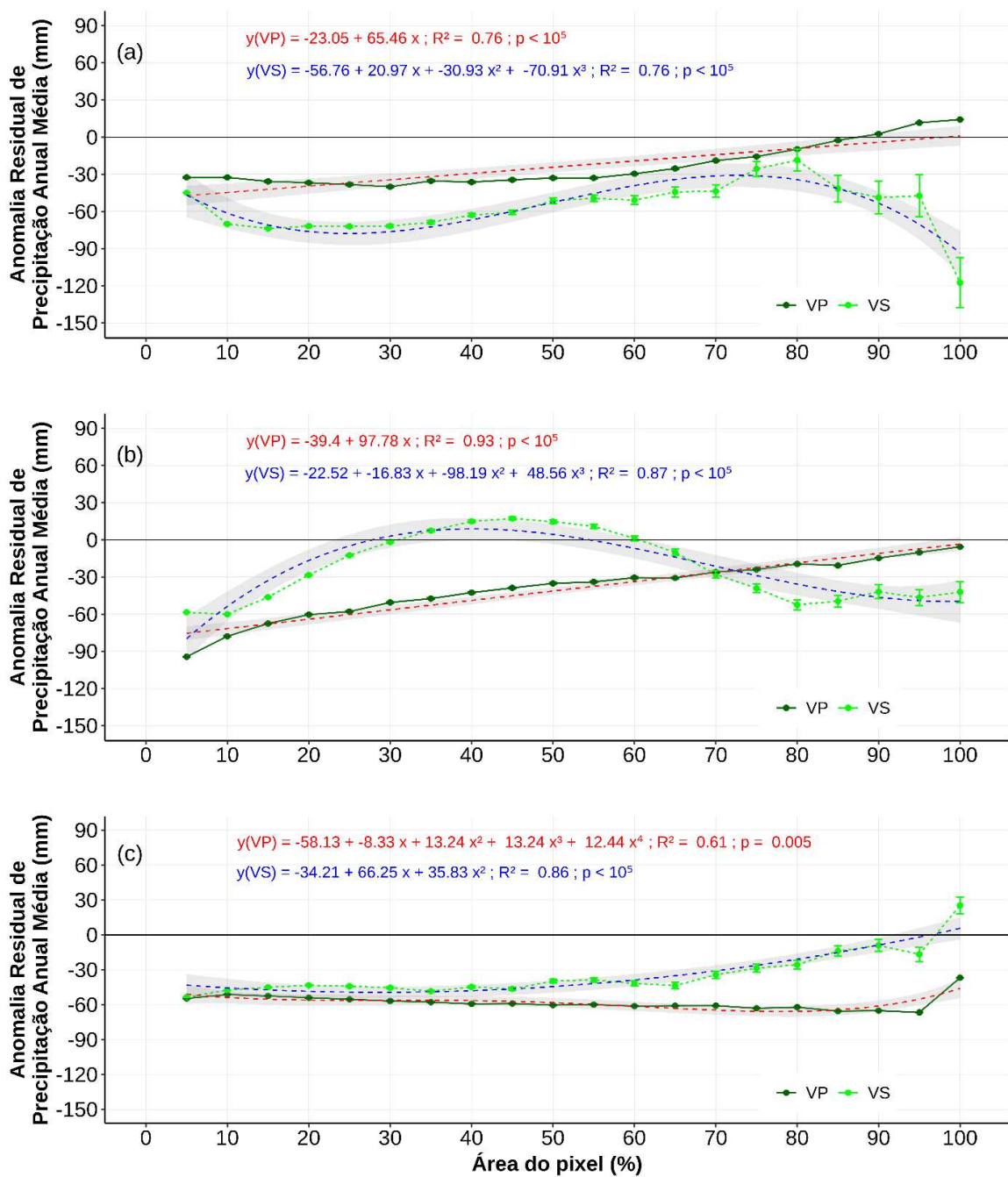
Fonte: Autora

### 5.3 Análises por porcentagem de área de FP e FS

#### 5.3.1 Anomalias residuais de precipitação anual (ARPA)

A Figura 12 apresenta o comportamento da ARPA média em função da cobertura de FP e FS dentro de um pixel de 1 km<sup>2</sup> para cada região. Como as regiões estão próximas ao Equador, cada pixel compreende uma área de aproximadamente 100 ha. Assim, cada 10% de área do pixel equivale a ~ 10 ha de cobertura vegetal.

**Figura 12.** Anomalias residuais médias de precipitação anual correspondente à cobertura de FP e FS nas regiões (a) CBA, (b) EBA e (c) SBA com o intervalo de confiança a 95% dos dados observados (barra de erro) e dos modelos (em cinza).



Fonte: Autora

Nas regiões EBA e SBA observa-se que mesmo para um pixel totalmente preenchido com FP, a ARPA média ainda é negativa. Nesse caso, deve-se lembrar que essas médias foram extraídas para um pixel de 1 km<sup>2</sup>, ou seja, trata-se de uma análise em escala local. É provável que a área coberta com FP não seja suficiente para aumentar a chuva nesse local e, por mais que influencie para ocorrência de chuvas, existe uma possibilidade de ocorrer uma turbulência termicamente induzida.

Assim como observado nas análises anuais, o comportamento da ARPA média para diferentes porcentagens de área diverge entre as regiões, principalmente para a cobertura de FS. Na região CBA, por exemplo, a contribuição da FS para o aumento da chuva não se iguala e nem supera a da FP em nenhuma das porcentagens de área. Além disso, para áreas cobertas com mais de 80% de FS, a contribuição é ainda menor. É importante destacar que, devido a quantidade reduzida de observações para maiores coberturas de FS, a incerteza é maior em relação as demais porcentagens (< 80%), embora ainda assim a ARPA da FS é significativamente menor que a da FP.

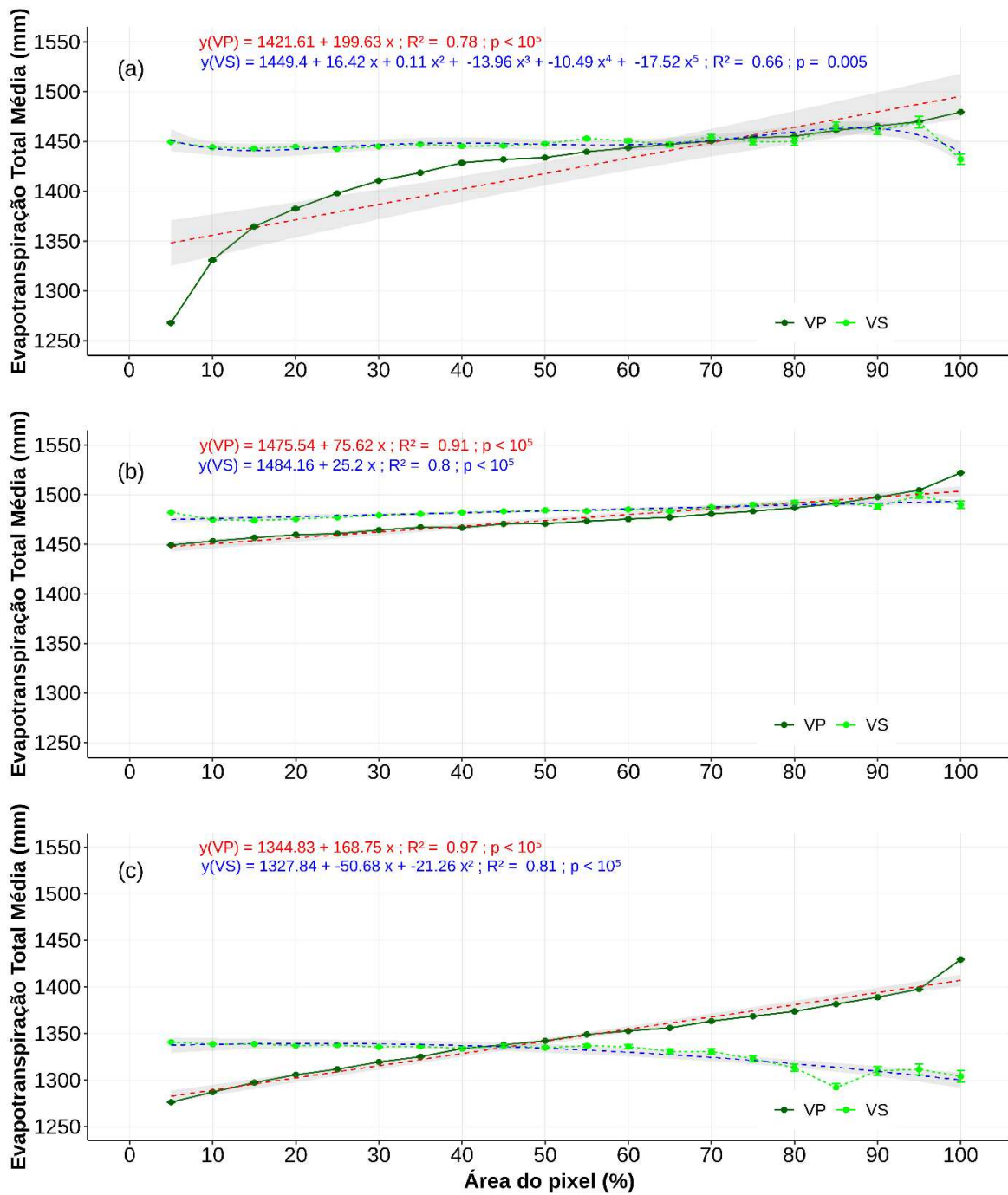
Com relação ao comportamento da ARPA em função da cobertura nas regiões leste e sul da Amazônia, observa-se que também são divergentes. Na EBA, coberturas pequenas e intermediárias de FS aumentam as chuvas em comparação com a FP, embora esse comportamento se inverta para coberturas elevadas (> 70%). Já na SBA, as ARPA da FP e FS são bem próximas para coberturas pequenas e intermediárias, e para coberturas elevadas (75%) a FS apresenta precipitação superior à da FP.

### **5.3.2 Evapotranspiração**

O comportamento da ET em função da cobertura de FP é similar nas três regiões de análise, e quanto maior a ocupação maior a ET (Figura 13). No entanto, a cobertura de FP da CBA apresenta uma variação muito maior (~200 mm) entre 5 e 100% de ocupação, enquanto a EBA e a SBA variam aproximadamente 50 e 150 mm, respectivamente, para esse mesmo intervalo de ocupação.

Para coberturas pequenas e médias (entre 5 e 55%), a ET da FS é superior à da FP, enquanto que, para elevadas coberturas a ET da FP é superior à da FS, com exceção da SBA que apresenta ET maior na FP a partir de 40% de área coberta.

**Figura 13.** Evapotranspiração total anual média correspondente à cobertura de FP e FS nas regiões (a) CBA, (b) EBA e (c) SBA.



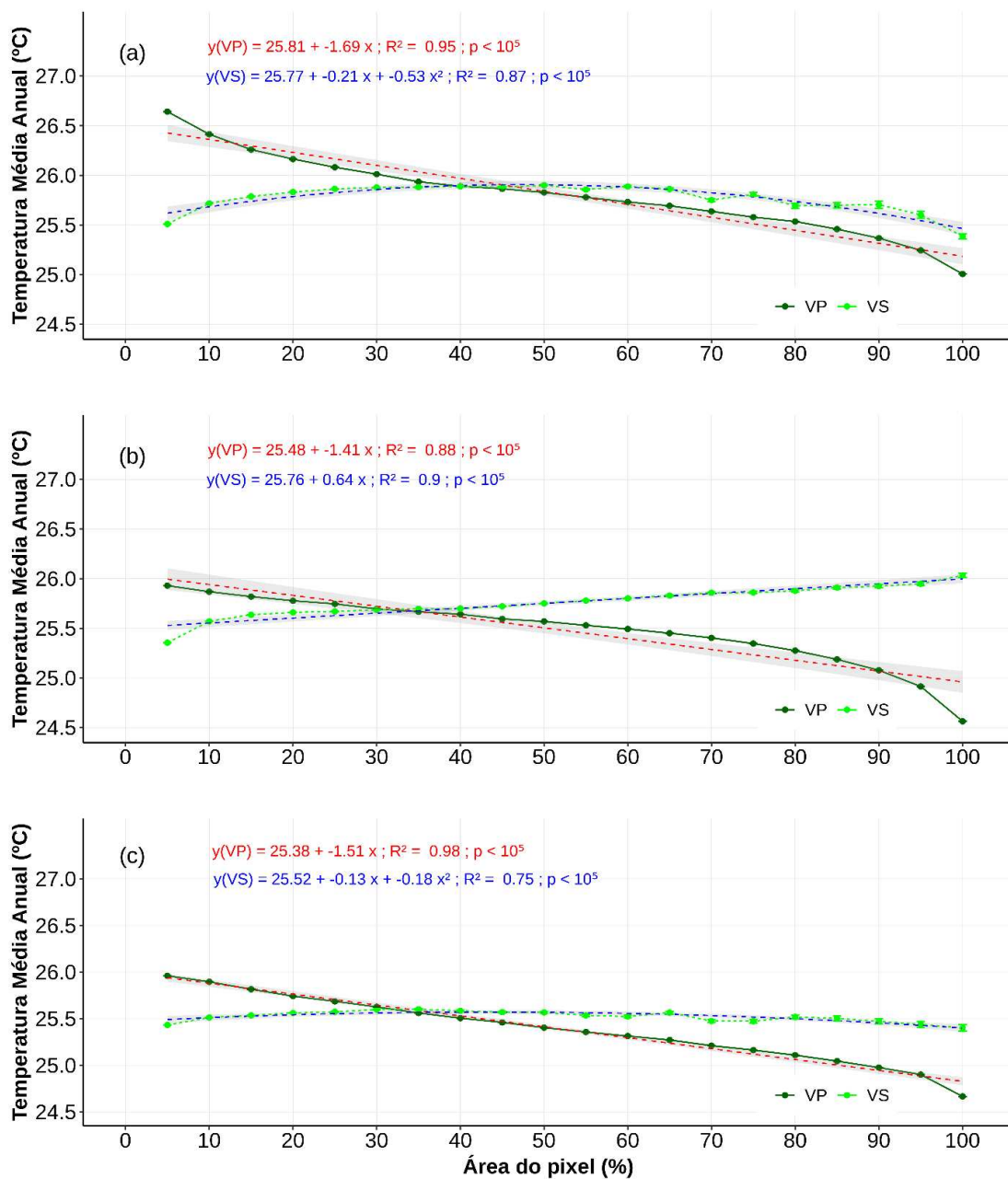
Fonte: Autora

### 5.3.3 Temperatura

O comportamento da temperatura da superfície em função da porcentagem de área ocupada com FP é similar em todas as regiões: a superfície resfria com o aumento da cobertura do terreno (Figura 14). Já na FS, a variação da temperatura da superfície ocorre de forma crescente até 60% de cobertura do terreno e decresce a partir desse ponto na CBA, é linearmente crescente na EBA e quase linear na SBA.

Na CBA, nas baixas coberturas de FS (< 50%) ocorrem maiores temperaturas, já que o dossel ainda não é de grande porte, deixando a superfície exposta para receber radiação sem interceptação da vegetação e aquecer mais. Essa tendência é invertida quando alcança maiores coberturas, se aproximando da temperatura da FP. Na EBA, ocorre um comportamento contraintuitivo, a temperatura da superfície aumenta com o crescimento da cobertura de FS. Entretanto, novamente, as características estruturais da FS podem influenciar nesse resultado.

**Figura 14.** Temperatura média da superfície correspondente à cobertura de FP e FS nas regiões (a) CBA, (b) EBA e (c) SBA.



Fonte: Autora

## 6. DISCUSSÃO

Estudos e monitoramentos do desmatamento evidenciam perdas de FP no bioma Amazônico ao longo dos anos analisados e como isso afeta o clima (EMBRAPA, 2018; INPE, 2021; Leite-Filho *et al.*, 2021). Essas perdas de FP podem ocorrer de diferentes formas e com fins diversos, entretanto, os seus impactos no fornecimento dos SE de regulação climática são efetivos, já que o ecossistema florestal amazônico influencia diretamente no clima local e regional.

Os padrões de perda apresentados na Figura 3 estão diretamente ligados ao desenvolvimento da agricultura na SBA (Leite-Filho *et al.*, 2021) e da agropecuária e mineração na EBA (SAMPAIO *et al.*, 2007; FILHO *et al.*, 2022; PEREIRA *et al.*, 2022). Esses novos usos da terra promovem alguns benefícios para sociedade, entretanto, também podem ser prejudicados caso os SE sofram alterações por causa das mudanças no LULC.

O surgimento e a permanência da FS pode ser uma alternativa para manter os SE prestados pelo ecossistema florestal, mas como apresentado na Figura 4, eles ocorrem de forma distinta em cada região. Na região SBA, por exemplo, como são desenvolvidas práticas agrícolas e o solo cultivável necessita de descanso (pousio) para conseguir renovar sua fertilidade, durante esse período a FS pode surgir, mas ao terminar o pousio, ser removida (SARAIVA *et al.*, 2020).

Segundo Y. Wang *et al.*, (2020), as poucas restrições governamentais e a maior acessibilidade à FS são responsáveis pela FS ter quase duas vezes maior probabilidade de ser removida do que a FP. Com isso, a maioria da FS não alcança os 20 anos de idade (CHAZDON *et al.*, 2016; JAKOVAC *et al.*, 2017; SCHWARTZ *et al.*, 2020), podendo dificultar seu desenvolvimento e, conseqüentemente, a prestação do SE de forma efetiva como a FS.

A fragmentação florestal observada na SBA por exemplo, aliada a explorações de grandes extensões de terra, pode provocar limitações na dispersão das árvores, dificultando a sucessão da FS. Além disso, por causa da erosão nas paisagens, a fertilidade química, física e biológica do solo é reduzida e ocorrem perdas de matéria orgânica, nutrientes e solo (JAKOVAC *et al.*, 2021; BORMA *et al.*, 2022).

Outro fator que contribui para não permanência da FS nessas regiões, é a ocorrência repetitiva de incêndios que, geralmente, matam a maior parte da comunidade arbórea, principalmente as mais jovens, afetando o recrutamento de árvores (BALCH *et al.*, 2011; BRANDO *et al.*, 2012). Com isso, a FS que persistir na paisagem permanecerá no estágio inicial de sucessão e acabará sendo dominada por poucas árvores maduras, que têm maior capacidade de tolerar o fogo (PONTES-LOPES *et al.* 2021), e espécies de palmeiras, gramíneas exóticas

invasoras e plantas herbáceas oportunistas (PERZ & SKOLE, 2003; VELDMAN & PUTZ, 2011), resultando em empobrecimento da biodiversidade (LENNOX *et al.*, 2018).

Mesmo com a aplicação de uma metodologia para remoção dos efeitos de localização e de larga escala nos dados de chuva, para obter apenas os efeitos do LULC nessa variável climática, foi possível observar que isso não ocorreu por completo. Entretanto, mesmo com a presença desses efeitos é possível notar que, embora façam parte do mesmo bioma, as diferentes características quanto ao tipo de solo, topografia, espécies e modificações antrópicas ao longo dos anos podem afetar o feedback do LULC no clima.

Contudo, ao comparar o comportamento das ARPA nos anos normais com os anos de ocorrência desses fenômenos é possível observar os efeitos do LULC na chuva. Em 1996, 2004 e 2006, por exemplo, nota-se que as ARPA são menos acentuadas (entre -300 e 300 mm) ao longo da extensão das regiões, mas existe a influência do LULC no aumento e na redução das chuvas.

Dentre os resultados apresentados, verificou-se que na SBA, de 1990 até 2000 e de 2002 a 2007, tanto a FP, quanto a FS não foram capazes de promover um aumento na chuva na região. Um dos fatores que pode explicar esse comportamento é a fragmentação das florestas nessa região por causa do desmatamento para desenvolvimento agrícola (LEITE-FILHO *et al.*, 2021).

Em geral, as regiões CBA e EBA apresentam uma maior sensibilidade aos eventos ENOS, em comparação com a região SBA. Como são regiões mais próximas ao Equador e com florestas diferentes da região SBA, podem sofrer com maior intensidade os impactos causados por esses eventos. Além disso, verificou-se que a FP contribui mais para ocorrência de chuva, em relação à FS na maioria dos anos em todas as regiões.

Dessa forma, compreender como os fatores climáticos atuam e como o LULC são modificados ao longo dos anos em cada região é fundamental para explicar esses comportamentos da ARPA. Para isso, são necessárias mais análises para isolar os efeitos do LULC e estudos futuros podem incluir, por exemplo, a integração de todas as variáveis em modelos generalizados mistos.

A contribuição da ET para formação de chuvas só é possível pela existência de árvores com raízes profundas (DAVIDSON *et al.*, 2012). As características das árvores quanto à capacidade de armazenamento de água da floresta presente em cada região e fatores como temperatura, umidade e radiação solar podem influenciar esses padrões. Árvores de raízes profundas, características das florestas tropicais, com elevada área foliar e rugosidade da superfície, exercem a reciclagem da água de forma eficaz, facilitando o fluxo ascendente de vapor de água (COSTA *et al.*, 2007, O'CONNOR *et al.*, 2021).

Comparando a cobertura florestal tropical com gramíneas em áreas de pastagem ou plantações de soja, essas condições favorecem a ocorrência de chuvas sobre as florestas. Em geral, foi possível notar que a CBA e a EBA apresentam maiores ET em relação à SBA na maioria dos anos, isso pode ser explicado pelo fato de estarem localizadas próximas ao Equador. Com isso, as árvores localizadas nessas regiões recebem maior incidência de radiação solar e as condições climáticas podem favorecer o seu desenvolvimento (raízes mais profundas, dosséis maiores, maior absorção de água).

Avaliando a ET para as diferentes coberturas, nas três regiões, a FS apresenta uma ET inferior a FP. Essa resposta da FS pode ser explicada por apresentar menor dossel, comprimento das raízes reduzido, limitando o potencial de absorção de água e nutrientes, sobretudo, nas épocas mais secas. Todas essas características alteram o balanço de energia, refletindo também no comportamento da temperatura. Com uma floresta em menor extensão e dossel em desenvolvimento, o fluxo de calor latente diminui (menor injeção de vapor de água através da transpiração das árvores) e aumenta o fluxo de calor sensível (DAVIDSON *et al.*, 2012; FOLEY *et al.*, 2013, LAWRENCE e VANDECAR, 2015). Essas mudanças no fluxo de água entre a superfície e atmosfera afetam a convecção atmosférica e a precipitação.

De forma geral, com base nos resultados encontrados para ET total média e temperatura da superfície, nas áreas cobertas com FS o fluxo de calor latente (menores ET) é menor e o fluxo de calor sensível (maiores temperaturas) é maior do que nas áreas de FP. Essas alterações, consequentemente, influenciam na ocorrência de chuvas e na oferta do SE prestado por essa cobertura.

Quando se analisa a ARPA em função da área ocupada, evidências mostram que para pequenas áreas desmatadas ou que apresentam pequenos fragmentos florestais (como é caso de muitas FS analisadas nesse estudo), a chuva pode aumentar devido a efeitos na circulação térmica local. Isso pode depender das condições climáticas da região, da fragmentação dos remanescentes florestais e do uso do solo no entorno. Entretanto, os estudos que analisam as respostas da cobertura em função de diferentes escalas são majoritariamente para FP e utilizam escalas maiores que 1 km<sup>2</sup> (LEITE-FILHO *et al.*, 2021).

Como os efeitos da FS no clima envolvendo os processos BGF ainda são pouco estudados e existem limitações quanto às resoluções espaciais dos dados de chuva, os comportamentos observados na Figura 12 podem ser contraintuitivos e precisam ser mais investigados. O estudo de Lawrence e Vandecar (2015), afirma que o ar quente ascendente localizado sobre a área desmatada provoca uma convergência do ar úmido das florestas

adjacentes para essa área. Visto que a FS pode surgir nessas áreas e ter extensões menores comparada à FP, essa turbulência pode estar ocorrendo nesses locais.

A adaptação das espécies que compõem a floresta Amazônica nos períodos de seca se deve à capacidade das raízes acessarem e redistribuírem a água profunda do solo, concedendo perenidade às copas durante esses períodos (NEPSTAD *et al.*, 1994; OLIVEIRA *et al.*, 2005). Diante disso, compreende-se que por causa de algumas características fisiológicas e estruturais da FS, ainda não é possível recuperar a regulação das chuvas ofertada pela FP, mesmo para elevados valores de cobertura do terreno.

No entanto, destaca-se que a FS nas regiões de análise é relativamente jovem (Figura 5 da seção 5.1) e com a evolução do processo sucessional (não é diretamente proporcional à idade da FS) podem ser modificadas as suas características e recuperar os serviços ecossistêmicos (JAKOVAC *et al.*, 2021), especialmente na CBA, que tem um histórico de interferência antrópica menos intenso comparado à EBA e à SBA. É importante ressaltar que, dependendo das características regionais, e.g., disponibilidade de propágulos e fertilidade do solo, a FS pode demorar muito mais tempo para atingir estágios mais avançados de sucessão.

Diante disso, compreende-se que todos os fatores mencionados podem trazer consigo novos *feedbacks* das coberturas e provocar alterações na estrutura e composição da floresta. O estudo de Flores *et al.*, (2019), indica que a interação entre a floresta fragmentada que ficou no local após perturbações no ecossistema e erosão do solo podem alterar a estabilidade das florestas tropicais fazendo com que elas persistam em estágios degradados.

## 7. CONCLUSÃO

Nos últimos anos, recorrentemente organizações e pesquisadores ao redor do mundo ressaltam a importância de preservar e restaurar os ecossistemas a fim de mitigar os impactos negativos causados pela degradação ambiental nos serviços ecossistêmicos. Ainda que exista a possibilidade de restauração, não é totalmente conhecido se, e quando os SE ofertados por ecossistemas recuperados naturalmente alcançam o mesmo nível de provisão que os originais.

Neste trabalho, considerou-se como SE de regulação climática do bioma Amazônico brasileiro a capacidade que a FS tem de controlar o clima regional, contribuindo com as chuvas, aumentando a evapotranspiração e reduzindo a temperatura da superfície em comparação com a FP. Para investigar se esse SE é recuperado, foram avaliadas as variações da ARPA, LST e ET em função das coberturas de FP e FS para uma grade de 1 x 1 km em três regiões do bioma: CBA, EBA e SBA.

Os resultados indicam que os efeitos da cobertura de floresta na ARPA variam entre as sub-regiões de estudo, enquanto os efeitos na temperatura e evapotranspiração são similares nas três regiões. Ainda, os efeitos da cobertura de FS podem ser dependentes da escala espacial analisada, o que deve ser investigado futuramente.

Especificamente, as análises anuais indicam que as áreas cobertas com FS, ainda muito jovens, apresentam temperaturas mais elevadas e menos chuva do que a FP em todos os anos estudados, não provendo ainda o nível do SE regulação climática original. Apesar disso, é possível que o nível de provisão aumente à medida que o processo sucessional, o que deve ser abordado em estudos futuros.

Há que se considerar ainda a dinâmica histórica, atual e futura do uso da terra e o agravamento das mudanças climáticas causadas pela ação antropogênica, que poderão moldar a manutenção da FP e o desenvolvimento da FS em cada uma das sub-regiões de estudo.

Por fim, destaca-se que a investigação do papel da FS no SE de regulação do clima é dependente de diversos fatores como a escala espacial de análise, o histórico do solo, as práticas a serem executadas no estágio inicial do desenvolvimento, as condições climáticas da região, a área ocupada pela cobertura e a idade da FS.

No entanto, como a FS ainda é uma cobertura de baixa – mas crescente – extensão espacial e permanência na Amazônia, há limitações quanto a análises para escalas espaciais maiores e ausência de informações históricas. Porém, com o desenvolvimento de políticas que apoiem, monitorem e fiscalizem essas áreas em regeneração, espera-se que essas limitações possam ser superadas, proporcionando análises mais detalhadas em diversas escalas. Com essas informações, pretende-se contribuir para o avanço do conhecimento sobre os efeitos da FS no

clima e no desenvolvimento de políticas de conservação de ecossistemas para mitigar os impactos negativos causados pela degradação e contribuir para tomada de decisões eficientes quanto à restauração das áreas degradadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ambrizzi T., de Souza E.B. PRS. (2004). **The Hadley and Walker Regional Circulations and Associated Enso Impacts on South American Seasonal Rainfall**. *The Hadley Circulation: Present, Past and Future*, 203–235.
- Artaxo, P., Almeida-Val, V. M.F., Bilbao, B., Brando, P., Bustamante, M, Coe, M. T., Correa, S. B., Cuesta, F., Costa, M. H., Miralles–Wilhelm, F., Salinas, N., Silvério, D. V., Val, A. L. (2021). **Impacts of Deforestation and Climate Change on Biodiversity, Ecological Processes, and Environmental Adaptation**. Science Panel for the Amazon. Amazon Assessment Report 2021.
- Bala, G., Caldeira, K., Wickett, M., Phillips, T. J., Lobell, D. B., Delire, C., & Mirin, A. (2007). **Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation**. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(16), 6550–6555. doi:10.1073/pnas.0608998104
- Balch, J. K., Nepstad, D. C., Curran, L. M., Brando, P. M., Portela, O., Guilherme, P., et al. (2011). **Size, species, and fire behavior predict tree and liana mortality from experimental burns in the Brazilian Amazon**. *Forest Ecology and Management*, 261(1), 68– 77. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.029>
- Betts, R. (2000). **Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo**. *Nature*, vol. 408, 187–190. <https://doi.org/10.1038/35041545>.
- Bonan, G. B. (2008). **Florestas e mudanças climáticas: Forças, feedbacks e os benefícios climáticos das florestas**. *Ciência* 320, 1444-1449.
- Borma, L. S, Costa, M. H., da Rocha, H. R., Arieira, J., Nascimento, N. C. C., Jaramillo-Giraldo, C., Ambrosio, G., Carneiro, R. G., Venzon M., Neto, A. F., van der Hoff, R., Oliveira, B. F. A., Rajão, R., Nobre, C. A. (2022). **Beyond carbon: The contributions of south American tropical humid and subhumid forests to ecosystem services**. *Reviews of geophysics (Washington, D.C.: 1985)*, v. 60, n. 4.
- Brando, P. M., Nepstad, D. C., Balch, J. K., Bolker, B., Christman, M. C., Coe, M., & Putz, F. E. (2012). **Fire-induced tree mortality in a Neotropical forest: The roles of bark traits, tree size, wood density and fire behavior**. *Global Change Biology*, 18(2), 630– 641. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02533.x>
- Brasil. Lei N° 14.119, de 13 de janeiro de 2021. **Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis nos 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política**. *Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, Capítulo 1, Art. 2.*
- Carvalho LMV, Jones C, Liebmann B. (2004). **The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall**. *Journal of Climate*, 17(1): 88–108. <https://doi.org/10.1175/15200442>
- Cavalcanti I. F. A. (2012). **Large scale and synoptic features associated with extreme precipitation over South America: A review and case studies for the first decade of the 21st century**. *Atmospheric Research. Elsevier B.V.*, 118: 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.06.012>.
- Cavalcante, R. B. L., Ferreira, D. B. da S., Pontes, P. R. M., Tedeschi, R. G., da Costa, C. P. W., & de Souza, E. B. (2020). **Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia**. *Atmospheric Research*, 238, 104879. doi:10.1016/j.atmosres.2020.104879
- Chazdon, R. L., Broadbent, E. N., Rozendaal, D. M. A., Bongers, F., Zambrano, A. M. A., Aide, T. M., et al. (2016). **Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics**. *Science Advances*, 2(5), e1501639.

- <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501639>
- Colaninno, N., & Morello, E. (2022). **Towards an operational model for estimating day and night instantaneous near-surface air temperature for urban heat island studies: outline and assessment.** *Urban Climate*, 46, 101320. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101320>
- Costanza, R., D'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van den Belt, M. (1997). **The value of the world's ecosystem services and natural capital.** *LK - https://royalroads.on.worldcat.org/oclc/4592801201. Nat. TA - TT - 387*, 253–260.
- Costanza, R.; De Groot, R.; Braat, L.; Kubiszewski, I.; Fioramonti, L.; Sutton, P.; Farber, S.; Grasso, M. **Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go?** *Ecosystem Services*, v. 28, p. 1–16, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>
- Costa, M. H. & Foley, J. A. (1999). **Trends in the hydrologic cycle of the Amazon basin.** *J. Geophys. Res.* 104, 14189–14198.
- Costa, M. H., Yanagi, S. N. M., Souza, P. J. O. P., Ribeiro, A., & Rocha, E. J. P. (2007). **Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion.** *Geophysical Research Letters*, 34(7), L07706. <https://doi.org/10.1029/2007GL029271>
- Costa, M. H. & Pires, G. F. (2010). **Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation.** *International Journal of Climatology*, vol. 30 1970–1979.
- Costa, M.H., Fleck, L.C., Cohn, A.S., Abrahão, G.M., Brando, P.M., Coe, M.T., Fu, R., Lawrence, D., Pires, G.F., Pousa, R., Soares-Filho, B.S. (2019). **Climate risks to Amazon agriculture suggest a rationale to conserve local ecosystems.** *Front. Ecol. Environ.* 17, 584–590. <https://doi.org/10.1002/fee.2124>
- Davidson, E. A., de Araújo, A. C., Artaxo, P., Balch, J. K., Brown, I. F., Bustamante, M. M. C., Coe, M. T., de Fries, R. S., Keller, M., Longo, M. Munger, W., Schroeder, W., Soares-Filho, B, Souza Júnior, C. M., Wofsy, S. C. (2012). **The Amazon basin in transition.** *Nature*, 481(7381), 321–328. doi:10.1038/nature10717
- Davin, E. L. & de Noblet-Ducoudré, N. (2010). **Climatic Impact of Global-Scale Deforestation: Radiative versus Nonradiative Processes.** *Journal of Climate*, vol. 23 97–112.
- De Mendonça, M. J. C., Vera Diaz, M. del C., Nepstad, D., Seroa da Motta, R., Alencar, A., Gomes, J. C., & Ortiz, R. A. (2004). **The economic cost of the use of fire in the Amazon.** *Ecological Economics*, 49(1), 89–105. doi:10.1016/j.ecolecon.2003.11.011
- Drumond, A., Marengo, J., Ambrizzi, T., Nieto, R., Moreira, L., & Gimeno, L. (2014). **The role of the Amazon Basin moisture in the atmospheric branch of the hydrological cycle: a Lagrangian analysis.** *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(7), 2577–2598. doi:10.5194/hess-18-2577-2014
- Elias, F., Ferreira, J., Lennox, G.D., Berenguer, E., Ferreira, S., Schwartz, G., Melo, L. de O., Reis Júnior, D.N., Nascimento, R.O., Ferreira, F.N., Espirito-Santo, F., Smith, C.C., Barlow, J. (2020). **Assessing the growth and climate sensitivity of secondary forests in highly deforested Amazonian landscapes.** *Ecology* 101. <https://doi.org/10.1002/ecy.2954>
- Embrapa, 2018. *Futuro da Agricultura Brasileira*. Embrapa 212.
- Farr T. G., Rosen P. A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. (2007). **The shuttle radar topography mission.** *Rev Geophys* 45(RG2004):1–33. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

- Ferreira, A. G., da Silva Mello, N. G. (2005). **Principais Sistemas Atmosféricos Atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a Influência dos Oceanos**. Revista Brasileira de Climatologia, 1(1): 15–28. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25215>.
- Filho, H. De O. et al. Dynamics of Fire Foci in the Amazon Rainforest and Their Consequences on Environmental Degradation. Sustainability, v. 14, n. 15, p. 9419, 1 ago. 2022.
- Flores, B. M., Staal, A., Jakovac, C. C., Hirota, M., Holmgren, M., & Oliveira, R. S. (2019). **Soil erosion as a resilience drain in disturbed tropical forests**. Plant and Soil, 450(1–2), 11–25. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04097-8>
- Foley, J. A., Costa, M. H., Delire, C., Ramankutty, N. & Snyder, P. **Green Surprise? How Terrestrial Ecosystems Could Affect Earth's Climate**. (2003). Frontiers in Ecology and the Environment, vol. 1, 38.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., Michaelsen, J. (2015). **The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes**. Sci. Data 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Giongo, P.; padovani, C.; vettorazzi, C. **Variabilidade espacial e temporal do albedo obtido a partir de imagens MODIS na região do Pantanal**. (2009). Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30.
- Giralt S, Moreno A, National S, Bao R, Saez A. (2007). **The History of the El Niño - Southern Oscillation according to lacustrine and marine sediments**. 343–353.
- Hastenrath S. 2012. **Exploring the climate problems of Brazil ' s Nordeste : a review**. Climatic Change, 112: 243–251. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0227-1>.
- Heinrich, V. H. A., Dalagnol, R., Cassol, H. L. G., Rosan, T. M., de Almeida, C. T., Silva Junior, C. H. L., Campanharo, W. A., House, J. I., Sitch, S., Hales, T. C., Adami, M., Anderson, L. O., Aragão, L. E. O. C. (2021). **Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change**. Nat Commun 12, 1785. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22050-1>
- Hölscher, D., Sá, T. D. A., Bastos, T. X., Denich, M. & Fölster, H. (1997). **Evaporation from young secondary vegetation in eastern Amazonia**. J. Hydrol. 193, 293–305.
- Huang, L., Zhai, J., Sun, C. Y., Liu, J. Y., Ning, J., & Zhao, G. S. (2018). **Biogeophysical Forcing of Land-Use Changes on Local Temperatures across Different Climate Regimes in China**. Journal of Climate, 31(17), 7053–7068. doi:10.1175/jcli-d-17-0116.1
- IBF - Instituto Brasileiro de Florestas. Bioma Amazônico, 2022. Disponível em: <https://www.ibflorestas.org.br/bioma-amazonico>. Acesso em: Set, 2022.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **PRODES - Amazônia. Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite, 2021**. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: Set, 2021.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Taxas PRODES Amazônia - 1988 a 2021 (km<sup>2</sup>)**. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: 24 jul. 2022
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Modelo de emissão. **INPE-EM: Estimativa de emissões dos gases do efeito estufa (GEE) por mudanças de cobertura da terra**. Disponível em: <http://inpe-em.ccst.inpe.br/>. Acesso em: 21 jan. 2023.
- Jakovac, C. C., Junqueira, A. B., Crouzeilles, R., Peña-Claros, M., Mesquita, R. C. G., & Bongers, F. (2021). **The role of land-use history in driving successional pathways and its implications for the restoration of tropical forests**. Biological Reviews, 96(4), 1114–1134. doi:10.1111/brv.12694
- Labarre, S., Jacquemoud, S., Ferrari, C., Delorme, A., Derrien, A., Grandin, R., Jalludin,

- Lemaître, M., Métois, F., M., Pierrot-Deseilligny, M., Rupnik, E., Tanguy, B. (2019). **Retrieving soil surface roughness with the Hapke photometric model: Confrontation with the ground truth.** *Remote Sens. Environ.*, 225, pp. 1-15
- Lawrence, D., Vandecar, K. (2015). **Effects of tropical deforestation on climate and agriculture.** *Nature Clim Change* 5, 27–36. <https://doi.org/10.1038/nclimate2430>
- Leite-Filho, A. T., Costa, M. H. & Fu, R. (2019). **The southern Amazon rainy season: The role of deforestation and its interactions with large-scale mechanisms.** *International Journal of Climatology*, vol. 40, 2328–2341.
- Leite-Filho, A. T., Soares-Filho, B. S., Davis, J. L., Abrahão, G. M. & Börner, J. (2021) **Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon.** *Nature Communications*, vol. 12.
- Lennox, G. D., Gardner, T. A., Thomson, J. R., Ferreira, J., Berenguer, E., Lees, A. C., et al. (2018). **Second rate or a second chance? Assessing biomass and biodiversity recovery in regenerating Amazonian forests.** *Global Change Biology*, 24(12), 5680– 5694. <https://doi.org/10.1111/gcb.14443>
- Lovejoy, T. E. & Nobre, C. **Amazon Tipping Point.** *Sci. Adv.* 4, eaat2340(2018). DOI:10.1126/sciadv.aat2340
- MANABE, S (2019). **Role of greenhouse gas in climate change.** *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, v. 71, n. 1, p. 1–13.
- Marengo, J. A., Souza, C. M., Thonicke, K., Burton, C., Halladay, K., Betts, R. A., Alves L. M., Soares, W. R. (2018). **Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends.** *Frontiers in Earth Science*, 6. doi:10.3389/feart.2018.0022
- MEDEIROS, R.; YOUNG; C.E.F.; PAVESE, H. B.; ARAÚJO, F. F. S. (2011). **Contribuição das unidades de conservação brasileiras para a economia nacional: sumário executivo.** 44p., UNEP-WCMC - United Nations Environment Programme – World Conservation Monitoring Centre, Brasília, DF, Brasil.
- Melo, A.B.C. de, Cavalcanti, I. (2009). **Zona de Convergência Intertropical do Atlântico**, in: Cavalcanti, I.F. de A., Ferreira, N.J., Silva, M.G.A.J. da, Dias, M.A.F. da S. (Eds.), *Tempo e Clima No Brasil. Oficina de Textos*, São Paulo, SP
- Millenium Ecosystem Assessment (MEA). **Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis.** Washington, DC: World Resources Institute, 2005. Disponível em: [https://doi.org/10.5822/978-1-61091-484-0\\_1](https://doi.org/10.5822/978-1-61091-484-0_1)
- Nepstad, D. C., de Carvalho, C. R., Davidson, E. A., Jipp, P. H., Lefebvre, P. A., Negreiros, G. H., da Silva, E. D., Stone, T. A., Trumbore, S. E., Vieira, S. (1994). **The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures.** *Nature*, 372(6507), 666–669. doi:10.1038/372666a0
- NOAA National Centers for Environmental Information. (2022) **Monthly Global Climate Report for Annual.** Published online January 2023, retrieved on May 23, 2023 from <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213>.
- O'Connor, J. C., Dekker, S. C., Staal, A., Tuinenburg, O. A., Rebel, K. T., & Santos, M. J. (2021). **Forests buffer against variations in precipitation.** *Global Change Biology*, 27(19), 4686–4696. doi:10.1111/gcb.15763
- Oliveira, R. S., Bezerra, L., Davidson, E. A., Pinto, F., Klink, C. A., Nepstad, D. C., & Moreira, A. (2005). **Deep root function in soil water dynamics in Cerrado savannas of central Brazil.** *Functional Ecology*, 19(4), 574–581. doi:10.1111/j.1365-2435.2005.01003.x
- Pereira, W. V. Da S, Ramos, S. J., Melo, L. C. A., Braz, A. M. de S., Dias, Y. N., Almeida, G. V., Fernandes, A. R. **Levels and environmental risks of rare earth elements in a gold mining area in the Amazon.** *Environmental Research*, v. 211, p. 113090, ago. 2022.
- Perz, S. G., & Skole, D. L. (2003). **Social determinants of secondary forests in the Brazilian**

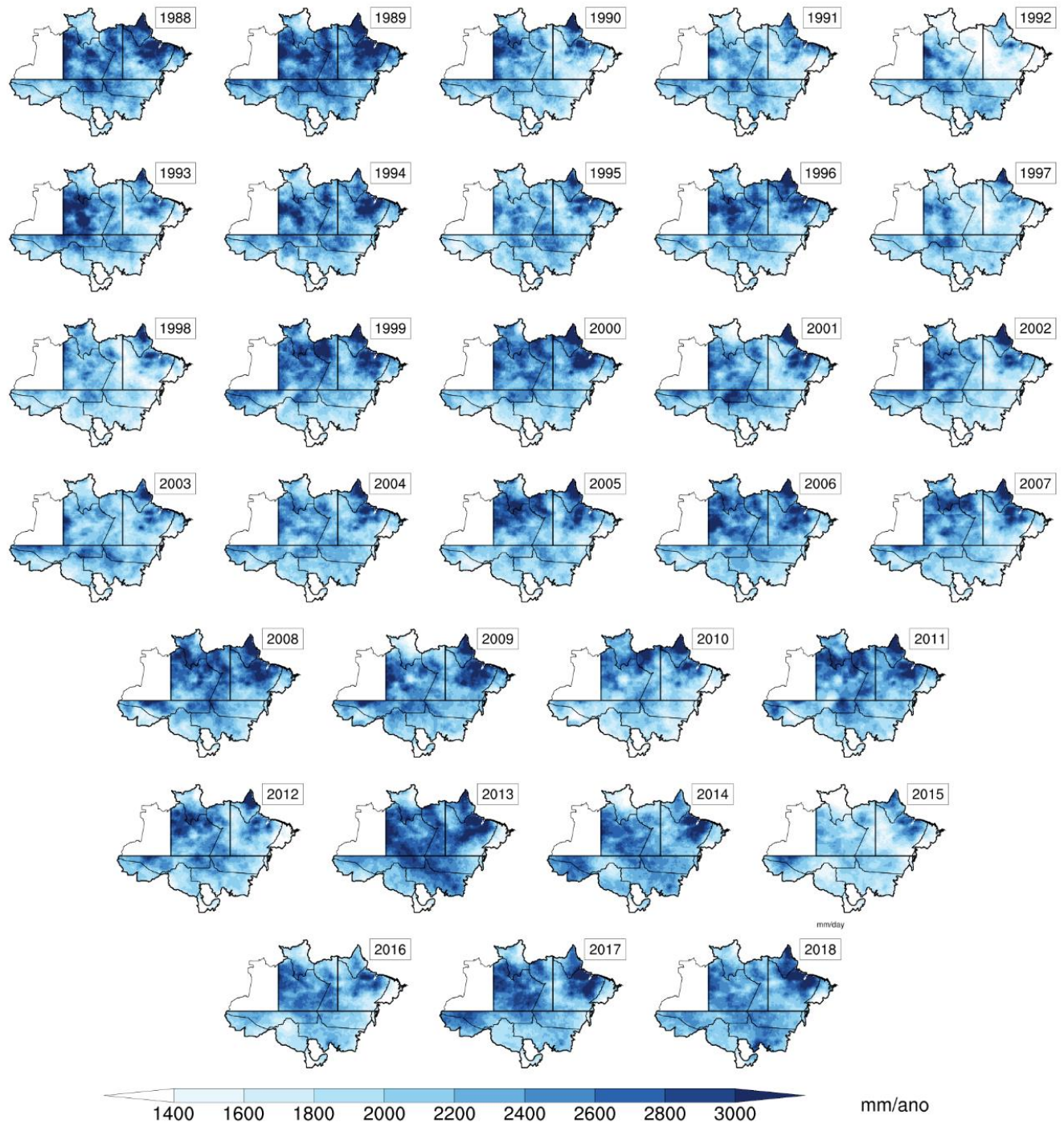
- Amazon.** Social Science Research, 32(1), 25– 60. [https://doi.org/10.1016/S0049-089X\(02\)00012-1](https://doi.org/10.1016/S0049-089X(02)00012-1)
- Pezzi, L. P., Quadro, M. F. L., Souza, E. B., Miller, A. J., Rao, V. B., Rosa, E. B., Santini, M. F., Bender, A., Souza, R. B., Cabrera, M. J., Parise, C. K., Carvalho, J. T., Lima, L. S., Quadros, M. R. L., Nehme, D. M., António, J. F. **Oceanic SACZ produces an abnormally wet 2021/2022 rainy season in South America.** Sci Rep 13, 1455 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28803-w>
- Pires, G. F., Abrahão, G. M., Brumatti, L. M., Oliveira, L. J. C., Costa, M. H., Liddicoat, S., Kato, E., Ladle, R. J. (2016) **Agricultural and Forest Meteorology Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems : Implications for land use in Northern Brazil.** Agric. For. Meteorol. 228–229, 286–298. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.07.005>
- Pontes-Lopes, A., Silva, C. V. J., Barlow, J., Rincón, L. M., Campanharo, W. A., Nunes, C. A., Almeida, C. T., Silva Júnior, C. H. L., Cassol, H. L. G., Dalagnol, R., Stark, S. C., Graça P. M. L. A., Aragão, L. E. O. C. **Drought-driven wildfire impacts on structure and dynamics in a wet Central Amazonian forest.** Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 288, n. 1951, p. 20210094, 19 maio 2021.
- Poorter, L., Bongers, F., Aide, T.M., Almeyda Zambrano, A.M., Balvanera, P., Becknell, J.M., Boukili, V., Brancalion, P.H.S., Broadbent, E.N., Chazdon, R.L., Craven, D., De Almeida-Cortez, J.S., Cabral, G.A.L., De Jong, B.H.J., Denslow, J.S., Dent, D.H., DeWalt, S.J., Dupuy, J.M., Durán, S.M., Espírito-Santo, M.M., Fandino, M.C., César, R.G., Hall, J.S., Hernandez-Stefanoni, J.L., Jakovac, C.C., Junqueira, A.B., Kennard, D., Letcher, S.G., Licona, J.C., Lohbeck, M., Marín-Spiotta, E., Martínez-Ramos, M., Massoca, P., Meave, J.A., Mesquita, R., Mora, F., Munõz, R., Muscarella, R., Nunes, Y.R.F., Ochoa-Gaona, S., De Oliveira, A.A., Orihuela-Belmonte, E., Penã-Claros, M., Pérez-García, E.A., Piotta, D., Powers, J.S., Rodríguez-Velázquez, J., Romero-Pérez, I.E., Ruíz, J., Saldarriaga, J.G., Sanchez-Azofeifa, A., Schwartz, N.B., Steininger, M.K., Swenson, N.G., Toledo, M., Uriarte, M., Van Breugel, M., Van Der Wal, H., Veloso, M.D.M., Vester, H.F.M., Vicentini, A., Vieira, I.C.G., Bentos, T.V., Williamson, G.B., Rozendaal, D.M.A. (2016). **Biomass resilience of Neotropical secondary forests.** Nature 530, 211–214. <https://doi.org/10.1038/nature16512>
- PNUMA. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. **Resolução 73/284: Década das Nações Unidas sobre Restauração de Ecossistemas (2021–2030)**, 2019. Disponível em: <https://undocs.org/A/RES/73/284>. Acesso em: 03 nov. 2022.
- Projeto MapBiomas – Coleção 6 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil (2022a). **ATBD – Entenda cada etapa.** Acesso em: 25 ago. 2022. Disponível em: <https://mapbiomas.org/atbd--entenda-cada-etapa>
- Projeto MapBiomas (2022b) – **Método Desmatamento.** Acesso em: 21 jan. 2023. Disponível em: <https://mapbiomas.org/metodo-desmatamento>
- Projeto MapBiomas (2022c) – **Estatística de Acurácia.** Acesso em: 25 jan. 2023. Disponível em: <https://mapbiomas.org/accuracy-statistics>
- Projeto MapBiomas (2022d) – **Coleção 6.0 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil.** Acesso em: 23 jan. 2023. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>
- Running, S.W., Mu, Q., Zhao, M., Moreno, A. (2019). MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm. NASA EOSDIS L. Process. DAAC 1–37.
- Sampaio, G., Nobre, C., Costa, M. H., Satyamurty, P., Soares-Filho, B. S., Cardoso, M. **Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean**

- cropland expansion**. *Geophysical Research Letters*, v. 34, n. 17, 13 set. 2007.
- Saraiva, M.B., Ferreira, M.D.P., da Cunha, D.A., Daniel, L.P., Homma, A.K.O., Pires, G.F. (2020). **Forest regeneration in the Brazilian Amazon: Public policies and economic conditions**. *J. Clean. Prod.* 269. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122424>
- Silva Junior, C. H. L., Heinrich, V. H. A., Freire, A. T. G., Broggio, I. S., Rosan, T. M., Doblaz, J., Anderson, L. O., Rousseau, G. X., Shimabukuro, Y. E., Silva, C. A., House, J. I., Aragão, L. E. O. C. (2020) . **Benchmark maps of 33 years of secondary forest age for Brazil**. *Sci. Data* 7, 269. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00600-4>
- Silva, R., Ayane, G., Felipe, C. (2016). **Tendências do controle climático oceânico sob a variabilidade temporal da precipitação no Nordeste do Brasil**. *Revista de Geografia Norte Grande*, 63: 9–26.
- Schwartz, N. B., Aide, T. M., Graesser, J., Grau, H. R., & Uriarte, M. (2020). **Reversals of reforestation across Latin America limit climate mitigation potential of tropical forests**. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 85. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00085>
- Souza C. M. Jr., Kirchhoff F. T., Oliveira B. C., Ribeiro J. G., Sales M. H. (2019). **Long-Term Annual Surface Water Change in the Brazilian Amazon Biome: Potential Links with Deforestation, Infrastructure Development and Climate Change**. *Water*; 11(3):566. <https://doi.org/10.3390/w11030566>
- Staal, A., Tuinenburg, O. A., Bosmans, J. H. C., Holmgren, M., van Nes, E. H., Scheffer, M., Zemp, D. C., Dekker, S. C. (2018). **Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon**. *Nature Climate Change*, 8(6), 539–543. doi:10.1038/s41558-018-0177-y
- Veldman, J. W., & Putz, F. E. (2011). **Grass-dominated vegetation, not species-diverse natural savanna, replaces degraded tropical forests on the southern edge of the Amazon Basin**. *Biological Conservation*, 144(5), 1419–1429. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.01.011>
- Vieira, I. C. G., de Almeida, A. S., Davidson, E. A., Stone, T. A., de Carvalho, C. J. R., Guerrero, J. B. (2003). **Classifying successional forests using Landsat spectral properties and ecological characteristics in eastern Amazonia**. *Remote Sens. Environ.* 87, 470–481
- Von Randow, R. de C. S., Tomasella, J., von Randow, C., de Araújo, A. C., Manzi, A. O., Hutjes, R., & Kruijt, B. (2020). **Evapotranspiration and gross primary productivity of secondary vegetation in Amazonia inferred by eddy covariance**. *Agricultural and Forest Meteorology*, 294, 108141. doi:10.1016/j.agrformet.2020.1081
- Zabaniotou A., Syrgiannis C., Gasperin D., de Hoyos Guevera A. J., Fazenda I., Huisingh D. (2020). **From Multidisciplinarity to Transdisciplinarity and from Local to Global Foci: Integrative Approaches to Systemic Resilience Based upon the Value of Life in the Context of Environmental and Gender Vulnerabilities with a Special Focus upon the Brazilian Amazon Biome**. *Sustainability*, 12(20):8407. <https://doi.org/10.3390/su12208407>
- Wang, L., Amos P. K. Tai, Chi-Yung Tam, Mehliyar Sadiq, Peng Wang, e Kevin K. W. Cheung. (2020). **Impacts of Future Land Use and Land Cover Change on Mid-21st-Century Surface Ozone Air Quality: Distinguishing between the Biogeophysical and Biogeochemical Effects**. *Atmospheric Chemistry and Physics* 20 (19): 11349–69. <https://doi.org/10.5194/acp-20-11349-2020>.
- Wang, Y., Ziv, G., Adami, M., Almeida, C. A. D., Antunes, J. F. G., Coutinho, A. C., et al. (2020). **Upturn in secondary forest clearing buffers primary forest loss in the Brazilian Amazon**. *Nature Sustainability*, 3(4), 290–295. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0470-4>

- Windisch, M. G., Davin, E. L. & Seneviratne, S. I. **Prioritizing forestation based on biogeochemical and local biogeophysical impacts**. *Nat. Clim. Chang*, vol. 11, 867–871 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01161-z>.
- Wittkuhn, R. S., Lamont, B. B., & He, T. (2017). **Combustion temperatures and nutrient transfers when grasstrees burn**. *Forest Ecology and Management*, 399, 179–187. doi:10.1016/j.foreco.2017.05.037

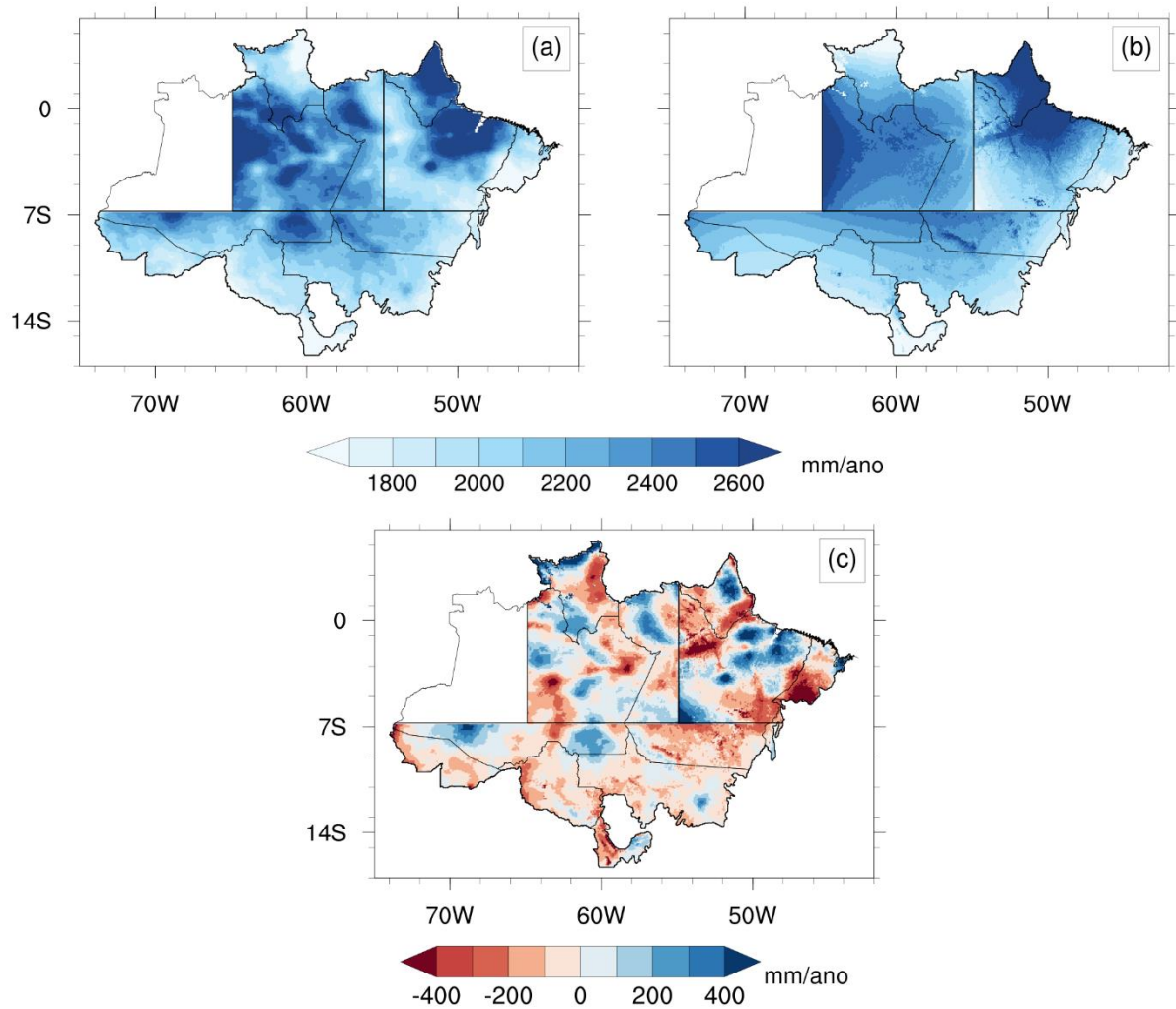
## APÊNDICE A

## A1 – Variabilidade da precipitação total anual nas regiões CBA, EBA e SBA, elaborada com dados do CHIRPS

**Figura 15.** Distribuição espacial da precipitação total anual (mm/ano) de 1986 a 2020 para as regiões CBA, EBA e SBA, elaborada com dados do CHIRPS.

## A2 – Diferença entre precipitação estimada pelo modelo polinomial de terceiro grau e a precipitação absoluta da climatologia do período entre 1988 e 2018

**Figura 16.** Distribuição espacial da (a) climatologia da precipitação anual para o período entre 1988-208, (b) precipitação estimada pelo modelo polinomial de terceiro grau e (c) diferença entre a climatologia e a precipitação estimada.



**A3 – Resumo dos resultados da implementação dos modelos de regressão nos dados de climatologia da precipitação no período entre 1988 a 2018 para as três regiões.**

**Tabela 1.** Resumo dos resultados dos modelos de regressão aplicados à climatologia da precipitação no período entre 1988 e 2018 para as regiões CBA, EBA e SBA.

Região	Modelo de Regressão									
	Linear		Polinomial de 2º Grau		Polinomial de 3º Grau		Polinomial de 4º Grau		Polinomial de 5º Grau	
	R <sup>2</sup>	P-valor	R <sup>2</sup>	P-valor	R <sup>2</sup>	P-valor	R <sup>2</sup>	P-valor	R <sup>2</sup>	P-valor
CBA	0,27	<0,001	0,59	<0,001	0,63	<0,001	0,66	<0,001	0,68	<0,001
EBA	0,52	<0,001	0,70	<0,001	0,71	<0,001	0,74	<0,001	0,76	<0,001
SBA	0,55	<0,001	0,71	<0,001	0,80	<0,001	0,81	<0,001	0,84	<0,001

**A4 – Quantidade de observações obtidas na extração pixel a pixel por ano e por porcentagem de área das coberturas de FP e FS em cada região**

**Tabela 2.** Relação da quantidade de observações (pixels de 1 km<sup>2</sup>) de cada região por ano para as coberturas de FP e FS.

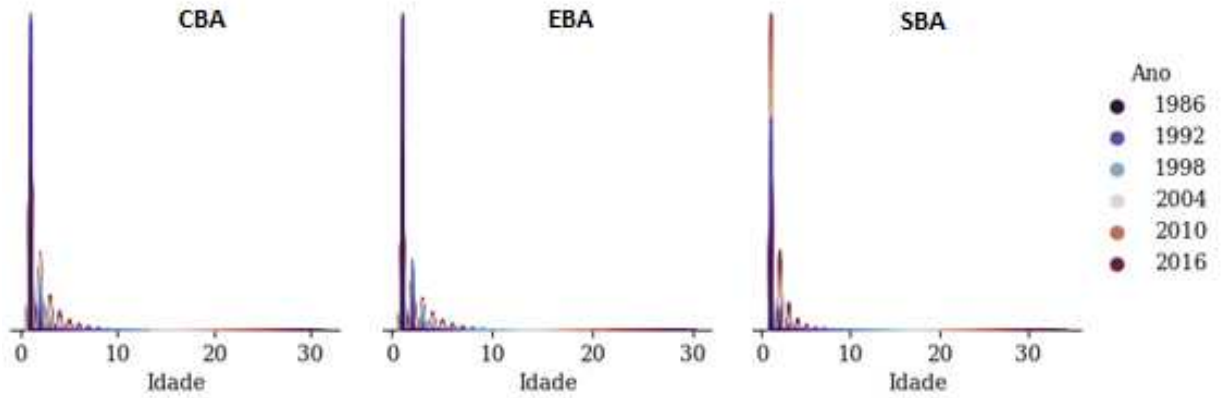
Ano	CBA		EBA		SBA	
	Quant. Obs.		Quant. Obs.		Quant. Obs.	
	FP	FS	FP	FS	FP	FS
1988	1128556	24826	835984	72587	1499290	31031
1989	1128453	48500	833509	119288	1495685	68295
1990	1128426	65051	831363	175598	1493107	102193
1991	1127949	78995	829202	201549	1490051	136465
1992	1127443	84918	826355	216841	1485471	156196
1993	1127143	88451	823840	230581	1481203	166039
1994	1126830	92161	821122	235612	1476155	170901
1995	1126610	98486	817719	252948	1469233	179370
1996	1126251	106604	814229	260618	1462785	187774
1997	1125906	108904	811153	267249	1456704	196382
1998	1125770	112628	806953	275929	1450754	208361
1999	1125519	115938	803215	282552	1443912	210621
2000	1125080	119236	799388	290804	1438369	217287
2001	1124640	128500	796117	315274	1433025	229572
2002	1124425	133309	792815	320636	1427393	239349
2003	1124315	137978	789631	328023	1420296	257762
2004	1123877	142005	786089	330874	1413276	271845
2005	1123526	146540	783038	338822	1406441	283155
2006	1123308	151854	780095	340931	1401781	298754
2007	1123088	154127	777457	345803	1398180	309855
2008	1122855	159283	774767	350166	1394381	323715
2009	1122582	163175	772900	358556	1392287	338715
2010	1122355	165025	771226	364605	1390574	350755
2011	1122318	167591	769828	372298	1388580	361429
2012	1122115	170617	768336	379568	1387303	372830
2013	1121770	173710	766977	389119	1384993	385515
2014	1121513	175216	765335	393834	1382418	400373
2015	1121246	174828	763449	395163	1380211	404491
2016	1120787	173839	761531	393432	1378169	412112
2017	1120651	174525	760112	394445	1376019	416082
2018	1120520	176243	758736	395898	1374148	417324

**Tabela 3.** Relação da quantidade de observações (pixels de 1 km<sup>2</sup>) de cada região por porcentagem de área das coberturas de FP e FS.

% Area	CBA		EBA		SBA	
	Quant. Obs.		Quant. Obs.		Quant. Obs.	
	FP	FS	FP	FS	FP	FS
5	520974	2109244	1165543	4206082	1605141	5121653
10	410456	834864	898273	1930405	1172356	1581791
15	331314	406512	707993	1058098	880312	613583
20	294494	234820	610271	672735	731981	300820
25	272264	146076	544992	455054	644420	166468
30	260774	94442	506407	316728	590891	99224
35	261621	62303	477784	223054	547329	63042
40	262753	41235	458847	159417	524621	43133
45	261530	27464	441026	113279	510866	30618
50	267779	19149	430493	80467	503524	22144
55	281248	12792	427400	55530	512041	16329
60	294782	8184	429558	38351	526094	11998
65	314775	5587	437634	26370	546334	8574
70	349061	4043	456072	17920	589674	6685
75	389080	2701	483024	12220	641123	5066
80	448836	1500	527709	8485	740153	4171
85	547441	890	608712	6072	883683	3163
90	730112	592	781194	4288	1168645	2678
95	1077791	402	1245876	3146	1857112	1941
100	27278742	263	12953663	1902	29095894	1467

**A5 – Gráficos de distribuição de frequência da idade da FS no período entre 1986 e 2020 nas regiões CBA, EBA e SBA.**

**Figura 17.** Distribuição de frequência da idade da FS por ano nas regiões CBA, EBA e SBA.



## ANEXO A

**ANEXO A1 - Classificação dos eventos de El Niño e La Niña de acordo com o Índice Niño Oceânico (ONI) entre 1950 e 2023.**

**Anexo A1.** Classificação dos eventos de El Niño e La Niña de acordo com o Índice Niño Oceânico (ONI), com os respectivos anos de ocorrência.

El Niño - 26				La Niña - 24		
Weak - 11	Moderate - 7	Strong - 5	Very Strong - 3	Weak - 11	Moderate - 6	Strong - 7
1952-53	1951-52	1957-58	1982-83	1954-55	1955-56	1973-74
1953-54	1963-64	1965-66	1997-98	1964-65	1970-71	1975-76
1958-59	1968-69	1972-73	2015-16	1971-72	1995-96	1988-89
1969-70	1986-87	1987-88		1974-75	2011-12	1998-99
1976-77	1994-95	1991-92		1983-84	2020-21	1999-00
1977-78	2002-03			1984-85	2021-22	2007-08
1979-80	2009-10			2000-01		2010-11
2004-05				2005-06		
2006-07				2008-09		
2014-15				2016-17		
2018-19				2017-18		
				2022-23		

Fonte: <https://ggweather.com/enso/oni.htm>