



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

- MESTRADO -

**DESMATAMENTOS E QUEIMADAS NA AMAZÔNIA
ENTRE 2001–2020: IMPACTOS NA VARIABILIDADE DA
PRECIPITAÇÃO E DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE**

por

Aricson Garcia Lopes

*Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Mestre*

João Pessoa–Paraíba

Setembro de 2021

Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
- MESTRADO -

Aricson Garcia Lopes

DESMATAMENTOS E QUEIMADAS NA AMAZÔNIA
ENTRE 2001–2020: IMPACTOS NA VARIABILIDADE DA
PRECIPITAÇÃO E DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

João Pessoa–Paraíba

Setembro de 2021

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

L864d Lopes, Aricson Garcia.

Desmatamentos e queimadas na Amazônia entre 2001 e 2020 : impactos na variabilidade da precipitação e da temperatura da superfície / Aricson Garcia Lopes. - João Pessoa, 2021.

80 f. : il.

Orientação: Richarde Marques da Silva.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Mudanças climáticas. 2. Desmatamento. 3. Queimadas. 4. Sensoriamento remoto. 5. Geoprocessamento. 6. Áreas indígenas. I. Silva, Richarde Marques da. II. Título.

UFPB/BC

CDU 551.583 (043)



***“DESMATAMENTOS E QUEIMADAS NA AMAZÔNIA ENTRE 2001-2020:
IMPACTOS NA VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO E DA TEMPERATURA
DA SUPERFÍCIE”***

ARICSON GARCIA LOPES

Dissertação aprovada em 30 de setembro de 2021

Período Letivo: 2021.2


Prof. Dr. Richarde Marques da Silva – UFPB
Orientador


Prof. Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho – UFPB
Examinador Interno


Prof. Dr. José Yure Gomes dos Santos - UFRN
Examinador Externo

João Pessoa-PB

Setembro de 2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me concedido a oportunidade de cursar a pós-graduação e também conhecer essa cidade linda que é João Pessoa, e por sempre ter iluminado o meu caminho e guiado meus passos.

Ao meu pai, Adeval Lira Lopes, por ter me dado educação e amor, e por sempre estar disposto a me ajudar. Exemplo de pai, homem que eu mais admiro e me espelho.

A minha mãe, Eliana Garcia, por ser essa mãe maravilhosa que é, por sempre estar ao meu lado, me ajudando em todas as horas de preocupação, me aconselhando, muito obrigado, Mãe!

A minha irmã, Avilyn Barbara, por sempre me incentivar a seguir esse caminho de pesquisas e estudos, sem o seu incentivo, hoje eu não estaria aqui.

Ao meu irmão caçula, Anderson Felipe, meu companheiro de todas as horas, a quem tenho um amor inexplicável.

A minha namorada, Paula Raiani, por sempre me apoiar e me incentivar na vida acadêmica e pessoal.

Ao meu orientador, professor Dr. Richarde Marques da Silva, por suas valiosas contribuições para a realização deste trabalho, por todo o incentivo na vida acadêmica, sem sua contribuição, não seria possível chegar ao resultado final dessa pesquisa. Muito obrigado!

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM – UFPB), por suas valiosas contribuições no decorrer desses anos que passei na universidade, que foram fundamentais para a minha formação profissional.

Agradeço também aos amigos que fiz no decorrer da pós-graduação e agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida para o mestrado. Ajuda financeira que foi de fundamental importância para o desenvolvimento da pesquisa.

Por fim, agradeço a você que está lendo este texto, por dedicar o seu tempo a ler o meu trabalho, o qual é fruto de grande dedicação e esforço. Muito obrigado!

RESUMO

As mudanças climáticas e no uso e cobertura da terra são graves problemas que interferem em áreas de proteção indígenas e na variabilidade climática na Amazônia. Nas últimas décadas, a área do bioma Amazônia vem sofrendo constantes queimadas e desmatamentos, causando severos problemas ao meio ambiente, porque impactam consideravelmente a paisagem e o ciclo hidrológico, acarretam perdas de biodiversidade da fauna e da flora, além de afetar a vida humana. Essas alterações vêm ocorrendo de forma acelerada desde o início da década de 2000, em virtude da pressão do agronegócio pela demanda de grãos alimentícios, mineração, uso de madeira, e pecuária bovina. Assim, o objetivo desta dissertação é analisar a influência dos desmatamentos e queimadas nas alterações do uso e cobertura da terra e na variabilidade da precipitação e da temperatura da superfície na Amazônia. Para realizar esta pesquisa, foram utilizados os seguintes métodos e procedimentos metodológicos: (a) mapeamento do uso e cobertura da terra, (b) análise da degradação da cobertura vegetal usando índices de vegetação, (c) análise das mudanças da cobertura vegetal, (d) mapeamento das queimadas, (e) análise da variabilidade climática (precipitação e temperatura da superfície), e (f) análise da influência climática e da cobertura da terra nos processos hidrológicos. A gravidade do problema é confirmada quando se analisa os dados sobre o desmatamento e o avanço de novos cultivos temporários na bacia, que podem afetar os fatores naturais, como: produção de água, qualidade dos solos, aumento do escoamento superficial, perdas de solo e produção de sedimentos. Os resultados mostraram grandes mudanças no uso e cobertura da terra entre 2001 e 2020 e os principais locais onde ocorreram queimadas no período analisado foram no arco do desmatamento. O estudo mostrou ainda que as áreas desmatadas vêm aumentando nas últimas décadas. Os resultados mostraram ainda que no período estudado, a precipitação apresentou uma diminuição, enquanto a temperatura da superfície se caracterizou pelo aumento dos valores. Pode-se concluir que as áreas de proteção indígenas vêm sofrendo com ações antrópicas e o bioma Amazônia vem perdendo uma considerável área de floresta entre 2001 e 2020.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, desmatamento, queimadas, Sensoriamento Remoto, Geoprocessamento, áreas indígenas.

ABSTRACT

Climate change and changes in land use and land cover are serious problems that affect indigenous protection areas and climate variability in the Amazon. In recent decades, the area of the Amazon biome has suffered constant fires and deforestation, causing severe problems to the environment, because they have a considerable impact on the landscape and the hydrological cycle, and lead to loss of fauna and flora biodiversity, in addition to affecting human life. These changes have been occurring at an accelerated pace since the 2000s, due to pressure from agribusiness by the demand for food grains, mining, the use of wood, and cattle raising. Thus, the objective of this project is to analyze the influence of deforestation and fires on changes in land use and land cover and on the variability of precipitation and surface temperature in the Amazon. To carry out this research, the following methods and methodological procedures were used: (a) mapping of land use and land cover, (b) analysis of vegetation cover degradation using vegetation indices, (c) analysis of vegetation cover changes, (d) burning mapping, (e) analysis of climate variability (precipitation and surface temperature), and (f) analysis of climate influence and land cover on hydrological processes. The seriousness of the problem is confirmed when analyzing data on deforestation and the advance of new temporary crops in the basin, which can affect natural factors such as: water production, soil quality, increased runoff, soil losses and sediment production. The results showed major changes in land use and land cover between 2001 and 2020 and the main locations where fires occurred during the analyzed period. The study also showed that deforested areas have been increasing in recent decades. The results also showed that during the studied period, precipitation showed a decrease, while surface temperature was characterized by an increase in values. It can be concluded that the indigenous protection areas have been suffering from anthropic actions and the Amazon biome has been losing a considerable area of forest between 2001 and 2020.

Keywords: Climate change, deforestation, burned, Remote Sensing, GIS, indigenous areas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação do bioma Amazônia na América do Sul.	23
Figura 2. Localização geográfica da área de estudo.	25
Figura 3. Fluxograma dos procedimentos metodológicos que foram utilizados nesta pesquisa.	27
Figura 4. Área comum de mapeamentos do DETER-B, PRODES e área de estudo atual.	31
Figura 5. Distribuição geográfica do uso e ocupação da terra na Amazônia Legal em (a) 2001, (b) 2010 e (c) 2020.	38
Figura 6. Distribuição geográfica das queimadas por estado da federação para cada ano na Amazônia Legal, no período entre 2001 e 2020.	43
Figura 7. Espacialização da ocorrência de queimadas totais na Amazônia Legal em áreas indígenas para o período de 2001 a 2020.	44
Figura 8. Variabilidade da área desmatada total para cada ano na Amazônia Legal entre 2001 2020.	49
Figura 9. Espacialização das áreas desmatadas totais na Amazônia Legal no período compreendido entre 2001 e 2020.	51
Figura 10. Espacialização das áreas desmatadas por estado da federação para cada ano na Amazônia Legal, no período entre 2001 e 2020.	52
Figura 11. Distribuição geográfica do NDVI para a Amazônia Legal em (a) 2001, (b) 2010 e (c) 2020.	55
Figura 12. Distribuição geográfica da diferença do NDVI para a Amazônia Legal entre os períodos (a) 2001 a 2010 e (b) 2010 a 2020.	56
Figura 13. Distribuição geográfica das temperaturas máximas em cada ano na Amazônia Legal para os anos entre 2001 e 2020.	58
Figura 14. Distribuição geográfica das temperaturas médias anuais para cada ano na Amazônia Legal para os anos entre 2001 e 2020.	59
Figura 15. Variabilidade anual da área da temperatura média anual na Amazônia Legal para os anos de 2001 a 2020.	60
Figura 16. Precipitação média anual para a Amazônia Legal entre 2001 e 2020.	62
Figura 17. Distribuição temporal da precipitação média por estado entre 2001 e 2020.	64

Figura 18. Precipitação média anual (a) e precipitação média mensal (b) na Amazônia Legal entre 2001 e 2020. 64

Figura 19. Identificação das áreas com maior variação entre precipitação e temperatura da superfície..... 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Área geográfica dos estados da federação que compõem a Amazônia Legal, área indígena, e os percentuais das áreas indígenas em relação a área total e em relação a área indígena em 2020	26
Tabela 2. Percentual e área ocupada com o uso e ocupação da terra na Amazônia Legal em 2001, 2010 e 2020.	37
Tabela 3. Estatísticas das áreas de queimadas na Amazônia Legal para cada estado da federação no período entre 2001 e 2020.....	40
Tabela 4. Áreas de queimadas na Amazônia Legal para cada estado da federação entre 2001 e 2020.	42
Tabela 5. Áreas de desmatamentos em km ² na Amazônia Legal para cada estado da federação entre 2001 e 2020.....	47
Tabela 6. Análise estatística das áreas de desmatamentos na Amazônia Legal para o período quinquenal entre 2001 e 2020.	47
Tabela 7. Estatísticas das áreas de desmatamentos na Amazônia Legal para cada estado da federação no período analisado.....	50
Tabela 8. Comparação entre as áreas desmatadas entre o estudo atual, PRODES, e DETER-B	51
Tabela 9. Estatística descritiva do NDVI para a área de estudo	54
Tabela 10. Estatísticas da temperatura máximas anuais na Amazônia Legal para cada estado da federação para o período quinquenal de 2001 a 2020	60
Tabela 11. Análises estatísticas da precipitação por estado da Amazônia Legal entre 2001 e 2020	63

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Qualificação do Principal Problema a ser investigado	14
2. OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 Importância da Amazônia	17
3.2 Áreas de Proteção Indígena	18
3.3 Desmatamentos e Queimadas	19
3.5 Estimativa de Precipitação para a Amazônia e Sensoriamento Remoto.....	20
4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	23
4.1 Caracterização da área de estudo	23
4.2 Concepção Geral da Pesquisa	27
4.3 Mapeamento do uso e cobertura do solo	28
4.4 Analisando as mudanças no uso e cobertura da terra	28
4.5 Mapeamento dos desmatamentos e queimadas usando o Google Earth Engine ..	29
4.6 Mapeamento dos desmatamentos	29
4.7 Mapeamento das queimadas	30
4.8 Avaliação dos dados e comparação com os produtos DETER-B e PRODES	31
4.9 Variabilidade Climática: assimilação de dados meteorológicos obtidos por sensoriamento remoto	32
4.10 Análises estatísticas e tendências espaço-temporais das mudanças climáticas e do uso e cobertura da terra	33
4.10.1 Estatística descritiva	33
4.10.2 Análise Espacial da Precipitação	33

4.11 Análise espacial das queimadas e desmatamentos no clima.....	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 Mapeamento do uso e cobertura do solo	37
5.2 Análise espaço-temporal das queimadas na Amazônia Legal	39
5.3 Análise espaço-temporal do desmatamento na Amazônia Legal	45
5.4 Índices de Vegetação	53
5.5 Variabilidade da Precipitação e da Temperatura da Superfície	57
5.6 Identificação espacial das áreas com maior influência das queimadas e do desmatamento na precipitação e na temperatura da superfície	65
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
REFERÊNCIAS	69

1. INTRODUÇÃO

O desmatamento, ou seja, a supressão da vegetação nativa, é considerado um grande problema ambiental que causa perda de biodiversidade (TRIGUEIRO et al., 2020; SEMPER-PASCUAL et al., 2019). O desmatamento da floresta tropical é um processo influenciado por diversos fatores ambientais e antrópicos desigualmente distribuídos no espaço. Nas últimas décadas, a Amazônia vem sendo alvo constante de queimadas e desmatamentos. O desmatamento é um dos grandes problemas ambientais que o Brasil enfrenta na atualidade, é causado por diversos fatores, dentre eles destacam-se a conversão das florestas para a agricultura ou para a pecuária e a exploração madeireira ilegal (FEARNSIDE, 2010). As principais consequências do desmatamento são a perda de biodiversidade, a degradação do solo, mudanças climáticas e alterações no regime hidrológico (SANTOS et al., 2020; ALMEIDA et al., 2013).

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) mantém há mais de 20 anos um sistema de monitoramento de queimadas por satélite para todo o Brasil e boa parte da América do Sul (ALVES et al., 2021). Ao longo desses anos, foram desenvolvidas várias metodologias e sistemas de computadores que permitem identificar focos de calor em imagens de satélites de baixa resolução, tais como os satélites da série NOAA, GOES, TERRA, AQUA e METEOSAT. Neste estudo, foram comparados os focos de calor (queimadas) e desmatamentos para a Amazônia Legal, para o período de 2001 a 2020, utilizando-se dois satélites distintos, TERRA/MODIS e AQUA/MODIS, que permitem a detecção diária de queimadas a partir do processamento das suas bandas de 1 km de resolução espacial. Essa região foi escolhida devido a sua relevância ecológica, ambiental e hidrológica para o Brasil e para todo o planeta.

De acordo com Tucci (2001), a Amazônia brasileira representa 71,1% do total gerado da vazão no Brasil e, portanto, 36,6 % do total gerado na América do Sul e 8% em nível mundial. Foley et al. (2002) apontam a Amazônia como responsável por cerca de 13% de todo o escoamento superficial direcionado aos oceanos. Além disso, a vegetação possui um papel fundamental no comportamento do clima e nos processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica. De acordo com Almeida et al. (2013), a cobertura vegetal reduz a ocorrência de inundações, na medida em que intercepta a água da chuva, conserva e aumenta a capacidade de infiltração, contém e reduz a erosão e, o consequente depósito de sedimentos nos corpos hídricos.

A Amazônia apresenta-se atualmente como o maior bloco de floresta tropical remanescente e contínua do mundo, com um pouco mais de 80% de suas florestas ainda preservadas, sendo que destas, aproximadamente 60% são de domínio brasileiro (KALAMANDEEN et al., 2018). Além disso, é também o maior *hotspot* de biodiversidade do mundo, abrigando mais de 20% das espécies terrestres conhecidas (STICKLER et al., 2013). Com um clima tropical úmido mais aquecido, as florestas amazônicas são uma peça fundamental para o equilíbrio climático regional e global (MALHI et al. 2008). A vegetação tem papel fundamental em todo o processo hidrológico da região, principalmente na interceptação e evapotranspiração, atuando, diretamente, em todas as fases do ciclo hidrológico.

A alta concentração de precipitação na Amazônia e o volume de água nos rios fazem partes do grande ciclo hidrológico da região que auxilia outros biomas do Brasil, como por exemplo o Cerrado (MALHI et al., 2008). No entanto, o aumento na taxa de desmatamento na Amazônia coloca cada vez mais em risco as funções climáticas que a floresta desempenha. Cohen et al. (2007) aponta a alteração no uso do solo desencadeie modificações no ciclo hidrológico e balanço de energia e que consequentemente, acarretem mudanças climáticas em escalas regional e global.

A combinação de desmatamento com o avanço do aquecimento do planeta poderá aumentar as emissões de gases de efeito estufa por fogo. O aumento na frequência e intensidade de períodos de seca, com reduções no volume de chuva poderão ser comuns no futuro, em certas regiões da Amazônia. Além de períodos de seca mais intensa, a exploração desordenada de recursos florestais ajuda a elevar a “inflamabilidade” da vegetação. Sob essa nova ordem climática regional, o empobrecimento da floresta poderá se intensificar, culminando num processo de degradação florestal que poderá levar à “savanização” de boa parte da região (GALVÃO et al., 2012).

Dentre os principais fatores que andam na contramão do avanço do desmatamento, destacam-se as áreas de proteção Indígenas. Tais áreas são protegidas por lei. As Terras Indígenas (TIs) têm como objetivo proteger os direitos dos povos indígenas às suas terras e meios de subsistência, por razões sociais, culturais e de igualdade (MORETTI et al., 2014). Os povos indígenas desempenham um papel significativo e mensurável na manutenção de florestas e controle do desmatamento, reduzindo assim as emissões florestais de carbono e atenuando as mudanças climáticas (RICKETTS et al., 2010). Uma diversidade de estudos tem demonstrado que as TIs da Amazônia atuam

como elementos protetores nas pressões externas relacionadas à expansão das fronteiras do agronegócio, reduzindo o desmatamento (CORPUZ, 2018; JUSYS, 2018; SOARES-FILHO et al., 2010) e a ocorrência de incêndios (NEPSTAD et al., 2006) em comparação com as áreas fora de suas fronteiras.

Tendo em vista a importância da floresta amazônica e a importância das TIs na conservação da floresta, torna-se importante o estudo da dinâmica do uso do solo na região amazônica, bem como as consequências do desmatamento e queimadas e na variabilidade espacial da precipitação e das temperaturas máximas e médias da superfície ocorridas na Amazônia.

1.1.Qualificação do Principal Problema a ser investigado

O problema principal a ser investigado neste estudo, são as respostas da variabilidade espacial da precipitação e das temperaturas máximas e médias da superfície causados pelas alterações do uso da terra e do desmatamento. Assim, a hipótese deste estudo é que a dinâmica do desmatamento e as mudanças no uso e cobertura da terra interferem na variabilidade da precipitação e da temperatura da superfície no bioma Amazônia. Esse bioma está colocado entre as eco regiões mais ameaçadas do planeta, devido ao fato das mudanças que ele vem sofrendo pelas altas taxas de conversão de florestas em áreas agrícolas ou pastagens (HOEKSTRA et al., 2004).

Informações consistentes sobre a cobertura vegetal e o clima ao longo do tempo são importantes para o gerenciamento dos recursos hídricos e para o apoio às decisões de políticas públicas (DANTAS et al., 2020). Na América do Sul, historicamente, a maioria dos esforços para monitorar as mudanças na cobertura florestal tem se concentrado nas florestas tropicais (PENNINGTON et al., 2006, PORTILLO-QUINTERO e SÁNCHEZ-AZOFEIFA, 2010, Santos et al., 2011, Santos et al., 2020), com muita atenção dedicada às regiões sazonais úmidas, como é o caso da Amazônia, porém, mesmo assim, mais estudos devem ser realizados, tendo em vista a importância do bioma amazônico. Nesse sentido, os esforços de pesquisa e conservação com foco nesse bioma tropical devem ser intensificados e apoiados (BARREDA-BAUTISTA et al., 2011, GRECCHI et al., 2014).

Os desmatamentos e queimadas, aliado às mudanças climáticas têm alterado constantemente os regimes hidrológicos no bioma Amazônia, causando aumento da temperatura e severas secas nos últimos anos (ANDRÉASSIAN, 2004.). Os desmatamentos e queimadas das florestas são considerados graves problemas ambientais

atualmente no Brasil, porque causam perda de biodiversidade (TRIGUEIRO et al., 2020; SEMPER-PASCUAL et al., 2019). Os desmatamentos e queimadas de florestas tropicais influenciados por fatores antrópicos são desigualmente distribuídos no espaço e controlados por interesses econômicos, que se materializam na conversão de florestas em áreas para a agricultura, pecuária, mineração ou exploração de madeira ilegal (FEARNSIDE, 2017, ALMEIDA et al., 2013).

Um dos principais fatores antrópicos responsáveis pela alteração nos processos hidrológicos é a supressão da cobertura vegetal, causada pelos desmatamentos e queimadas. O desmatamento indiscriminado para a exploração de novas lavouras e pastagens, aliadas à retirada de madeira para ser usada como lenha ou carvão, queimadas sucessivas, e o manejo inadequado do solo, juntamente com as secas prolongadas têm contribuído para comprometer o equilíbrio ambiental e influenciar nos processos hidrológicos da região (SANTOS et al., 2021). Assim, o uso indevido da vegetação da Amazônia tem acelerado a erosão do solo, o empobrecimento do solo e causado impactos na hidrologia da região (ALENCAR et al., 2011).

Assim, este estudo tem como norte estudar a influência dos desmatamentos e queimadas na variabilidade da precipitação e da temperatura superficial na Amazônia. O modo como a agropecuária vem ocupando as áreas de florestas, é resultante do modelo de agricultura moderna voltado para o agronegócio, com pouca ou quase sem nenhuma preocupação conservacionista a longo prazo (CUNHA et al., 2021). Portanto, essas modificações e os impactos causados devem ser estudados.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar os impactos dos desmatamentos e as queimadas na Amazônia na variabilidade da precipitação e da temperatura da superfície entre 2001 e 2020.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Analisar as mudanças no uso e cobertura da terra na Amazônia para o período de 2001 a 2020.
- ✓ Espacializar os focos de queimadas ocorridos na Amazônia para o período de 2001 a 2020.
- ✓ Analisar a evolução espaço-temporal dos desmatamentos e queimadas na Amazônia para o período de 2001 a 2020.
- ✓ Analisar a variabilidade espacial da precipitação e das temperaturas máximas e médias da superfície ocorridas na Amazônia para o período de 2001 a 2020.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Importância da Amazônia

As alterações no uso e cobertura da terra em larga escala podem alterar significativamente a disponibilidade de água, e ter influência direta na variabilidade natural do clima (PANDAY et al., 2015). A floresta amazônica se destaca por ser a maior floresta tropical contínua do mundo, com um total de aproximadamente 7 milhões de km² de extensão (MOREIRA et al., 2019), destes, aproximadamente 5,4 milhões de km² estão em território brasileiro, abrangendo cerca de 60% de todo o território nacional (KALAMANDEEN et al., 2018).

O desmatamento é um problema recorrente e de longa data no Brasil. Parte do princípio de que para haver desenvolvimento econômico é necessário extensas áreas de agricultura e pecuária, que são as duas principais atividades econômicas do Brasil. Fearnside (2017) e Carvalho et al. (2019) apontam essas duas atividades como as principais causadoras do desflorestamento no Brasil, seguidas do mercado ilegal de madeira.

O desmatamento ocorre por diversos motivos, que variam em diferentes períodos no tempo e em diferentes locais. Ciclos econômicos, como recessões e altos e baixos dos mercados de commodities, são uma influência (FEARNSIDE, 2017). A Amazônia experimentou um pico de desmatamento em 2004 (27.772 km²), área equivalente a aproximadamente metade do estado da Paraíba. No entanto, após as reformas no âmbito de leis ambientais e projetos de alarmes de desmatamento em tempo real do governo brasileiro, as taxas de desmatamento na Amazônia caíram quase 80% entre 2004 e 2012. Desde então, porém, o desmatamento voltou a aumentar lentamente (SCHIELEIN e BÖRNER, 2018).

O atual governo do Brasil vem favorecendo os interesses do agronegócio e agroindústria que intensificam os processos de desmatamento na Amazônia. Fato que denota claramente tal intenção foi a transferência da administração de terras indígenas do Ministério da Justiça para O Ministério da Agricultura, colocando em risco as áreas protegidas e milhares de indígenas da Amazônia (ARTAXO, 2019).

De acordo com Tucci (1998), o desmatamento tende a reduzir a evapotranspiração e aumentar o escoamento superficial devido ao menor índice de área

foliar, à diminuição da densidade e profundidade da raiz, e aumento da compactação do solo.

Recentemente, a Bacia Amazônica foi afetada por secas extremas em 2005 e 2010 e inundações em 2009, 2012 e 2014, que causaram enormes perdas sociais e econômicas (MARENGO, 2014). Ainda segundo o mesmo autor, projeções futuras do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) sugerem mais ocorrências de eventos hidrológicos extremos que afetarão principalmente a Amazônia e as região Nordeste, com maior frequência e duração das estações secas, além da ocorrência de chuvas torrenciais no sul do Brasil.

3.2 Áreas de Proteção Indígena

O Brasil tem uma extensão territorial de 8.511.965 km². Atualmente o Brasil tem um total de 725 terras indígenas, que ocupam uma extensão territorial de 1.173.776 km², o que representa 13.8% das terras do país. A maior parte das TIs concentra-se na Amazônia: são 424 áreas, 115.344.445 hectares, representando 23% do território amazônico e 98.25% da extensão de todas as TIs do país. O restante, 1.75%, espalha-se pelas regiões Nordeste, Sudeste, Sul e os estados de Mato Grosso do Sul e Goiás, no Centro-oeste do Brasil (ISA, 2021).

Tal distribuição de TIs pode ser explicada pelo fato de a colonização do Brasil ter sido iniciada pelo litoral, o que levou a embates diretos contra as populações indígenas que aí viviam, causando uma diminuição da população e desocupação das terras, que hoje estão em mãos da propriedade privada.

De acordo com Walker et al. (2020) de toda a biomassa estimada para região amazônica — 73 bilhões de toneladas de carbono — 58% ou 41,1 bilhões de toneladas de carbono encontram-se dentro de Territórios Indígenas e áreas protegidas. Ainda segundo o autor, as Terras Indígenas na Amazônia são menos propensas à perda líquida carbono do que regiões desprotegidas. Isso ocorre porque a liberação de carbono resultante de degradação em TIs é, em grande parte, compensada pelo crescimento da vegetação florestal, algo que acontece devido à sua proteção legal.

No cenário atual, as TIs estão propensas a invasões de garimpeiros, traficantes ilegais e traficantes de drogas. Entre muitos exemplos, grupos indígenas isolados, como os Yanomami, que vivem na fronteira brasileira, região rica em ouro, estão

particularmente ameaçados pelas estradas, que abrem seus territórios para mineração, e especulação imobiliária, expondo as comunidades à doenças às quais não têm imunidade (MULLER, 2020).

3.3 Desmatamentos e Queimadas

Com a intensa ocupação ocorrida na Amazônia no século XXI, houve uma considerável degradação de seus recursos naturais. Desde então, suas florestas vêm sendo alteradas e até mesmo eliminadas, inicialmente devido o valor comercial de sua biodiversidade faunística e florística e mais recentemente para dar lugar às diversas atividades econômicas. De acordo com Garcia et al. (2013), especialmente no estado de Rondônia, as áreas de florestas naturais são removidas principalmente para a formação de pastagem e criação de gado bovino, que é a principal atividade econômica do estado. Tais processos resultam em uma crescente fragmentação dos ecossistemas naturais (CASTRO, 2004; ROCHA et al., 2016).

Segundo Fearnside (2010), as estradas são o portão de entrada para o desmatamento. Além da pecuária, outra atividade intimamente relacionada com a retirada da vegetação é a agricultura, sobretudo o agronegócio de soja; a conversão de florestas em lavouras de soja tem sido crescente, visto que esta é uma commodity cada vez mais presente na Amazônia brasileira (FEARNSIDE, 2017.; SANTOS et al., 2020).

O desmatamento e a degradação da floresta são responsáveis por cerca de 15% das emissões globais de gases de efeito estufa, isso representa mais do que todos os carros, trens, aviões, navios e caminhões na terra (RICKETTS et al., 2010). Tal informação denota a importância do desmatamento nas alterações climáticas.

Nos últimos dois anos, período do atual governo federal brasileiro, houve diversos retrocessos nas políticas ambientais no Brasil. Fato que fez os alertas de desmatamento dispararem e se tornarem amplamente discutido internacionalmente. Um episódio emblemático foi o "Dia do Fogo", ocorrido no mês de agosto de 2019, quando fazendeiros no sudoeste do Pará, inflados pelas ações do atual governo, promoveram uma grande queimada coordenada de na região do Novo Progresso no estado do Pará. Houve, em apenas um dia, um salto de 300% dos focos de queimadas (INPE, 2019).

Vale et al. (2021) aponta que o atual governo tem aproveitado o cenário gerado pela Pandemia de Covid-19 para criar atos legislativos que visam a redução da proteção ambiental no Brasil.

3.5 Estimativa de Precipitação para a Amazônia e Sensoriamento Remoto

As estimativas de precipitação por satélite se iniciaram a partir da década de 1970, com o lançamento de satélites meteorológicos (CHAPPELL et al., 2013). De acordo com Pérez et al. (2013), esses satélites são veículos que orbitam a Terra, e que levam instrumentos óptico-eletrônicos (sensores) que imageiam a superfície terrestre do espaço, podendo ter uma órbita polar ou geoestacionária. Esses sensores detectam a radiação eletromagnética em determinados comprimentos de onda e monitoraram pontos específicos da Terra.

Os primeiros métodos de estimativa de precipitação por satélite fundamentavam-se em faixas de comprimento de onda correspondente ao visível e infravermelho, os quais correspondem a uma medição indireta, dependente da ocorrência de chuva. Posteriormente, surgiram metodologias que utilizavam imagens de sensores de micro-ondas, que correspondem fisicamente à presença de água e/ou cristais de gelo dentro da nuvem e não apenas na superfície (LEVIZZANI, 1999).

Satélites que utilizam sensores da faixa do visível seguem a premissa que tons mais brilhantes representam áreas com alta reflectância, correspondendo a nuvens mais espessas que produzem uma maior precipitação. Entretanto, isso nem sempre é verdade, pois o brilho não é função apenas da espessura das nuvens. A dimensão da nuvem e sua orientação em relação ao feixe incidente são importantes para determinar seu brilho. Dessa forma, raramente são usados somente os dados da banda visível para a estimativa de chuva, visto que, a relação entre o brilho da nuvem e a formação de chuva é fraca (VARMA, 2018).

Os sensores de raios infravermelhos medem a temperatura de brilho do topo das nuvens. Seguem o princípio que, a temperatura do brilho no topo da nuvem é um indicador da altura da nuvem e que os topos mais altos e mais frios produzem maior precipitação. Essa suposição nem sempre está correta, dado que, as nuvens mais frias nem sempre geram mais chuva. No entanto, percebe-se que a relação entre a taxa de chuva e a temperatura do brilho nas imagens infravermelho é mais forte em comparação com a taxa de chuva e o brilho das nuvens nas imagens do visível (VARMA, 2018).

Devido às limitações existentes nos sensores visível e infravermelho para estimar a precipitação, passou-se a utilizar sensores ativos de micro-ondas. A radiação de

micro-ondas pode interagir com os hidrometeoros (gotas de nuvem e cristais de gelo), com base nessas interações dois processos podem ser usados para estimar a precipitação: emissão e dispersão (KIDD e HUFFMAN, 2011). O processo de emissão de gotículas de chuva leva a um aumento na radiação de micro-ondas. Já a dispersão, causada pela precipitação de partículas de gelo, leva a uma diminuição na radiação de micro-ondas recebida. A magnitude desses efeitos depende do tamanho e da concentração das partículas. No entanto, esses processos não podem ser observados em todas as superfícies. Sobre a água, onde a emissividade de fundo é baixa, a emissão de gotas de chuva pode ser usada para quantificar a chuva. Nas superfícies terrestres, as emissões das gotículas de chuva sofrem interferência devido à emissividade de fundo ser mais alta e variável (SILVA et al., 2021).

Desta forma, estimativas com micro-ondas em continentes tendem a subestimar precipitações produzidas por nuvens com pouca ou nenhuma quantidade de gelo, como é o caso de nuvens orográficas em regiões subtropicais e tropicais (BRITO et al., 2021).

As medições com sensores do visível e infravermelho são mais adequadas para estudo de longo prazo com valores médios, enquanto produtos derivados de sensores de micro-ondas são mais adequados para medições instantâneas de precipitação (KIDD, 2001). Dessa forma, acredita-se que os melhores produtos de medição de precipitação com satélites são os que integram dados dos sensores infravermelho e micro-ondas. Atualmente, inúmeros produtos de precipitação de satélite de múltiplas fontes estão disponíveis em escala quase global (WANG et al., 2017; XU et al., 2017). Como exemplo, pode-se citar o *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), o *Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS), e o *Climate Prediction Center Morphing Method* (CMORPH).

Vários estudos estão sendo realizados para avaliar esses produtos de precipitação por satélite para diferentes áreas do mundo. Maidment et al. (2013) analisaram estimativas de chuvas derivadas de sete satélites e concluíram que essas precipitações produziam padrões semelhantes às observações terrestres. Soo et al. (2019) avaliaram três produtos de satélite na Malásia, e relataram que o TRMM apresentou melhor desempenho na bacia do Rio Kelantan quando comparado com o CMORPH e o PERSIANN. Zhao e Ma (2019) analisaram quatro produtos de estimativa de precipitação para o monitoramento de seca, baseados em diferentes produtos (CMORPH, CHIRPS, TRMM,

e PERSIANN) e constaram que o CHIRPS e TRMM podem ser usados como produtos de monitoramento de seca.

Almeida et al. (2015) avaliaram dados de precipitação da Amazônia via satélite, comparando as estimativas do produto 3B43 do satélite TRMM (2004-2008) com dados de sete estações meteorológicas convencionais. Os autores obtiveram um coeficiente de correlação igual a 0,83, concluindo que as estimativas de precipitação pluvial do produto 3B43 podem ser utilizadas como uma fonte alternativa de dados de qualidade. Cavalcante et al. (2020) compararam a precipitação mensal, os índices anuais de precipitação e suas tendências calculadas usando dados CHIRPS e observações dos pluviômetros. Os dados diários do CHIRPS forneceram precipitação mensal média semelhante à obtida com os dados das estações pluviométricas. Por outro lado, o produto CHIRPS tendeu a subestimar os valores dos meses mais chuvosos. Dessa forma, os autores ressaltaram que esses dados não são recomendados para estudos de eventos extremos, nem para projetar estruturas hidráulicas ou estudos de inundação.

Pereira Filho et al. (2015) efetuaram comparações de estimativas de precipitação do CMORPH com informações de pluviômetros na bacia Amazônica nos anos de 2003 e 2004, em escalas de tempo diária, mensal e anual. Os autores relatam que a correlação entre a precipitação derivada de satélite e a determinada por estação pluviométrica aumenta com o período de acumulação, variando de diário para mensal, principalmente durante a estação chuvosa. Ainda na região, Silva et al. (2019) utilizaram as estimativas do CMORPH para fazer preenchimento de falhas nas séries históricas de precipitação, determinando a distribuição espacial e temporal da erosividade das chuvas.

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1 Caracterização da área de estudo

Bioma Amazônia (Figura 1) é um conjunto de vida animal e vegetal interligado, que apresenta diversidade própria e caracteriza-se pela vegetação dominante (LATRUBESSE et al., 2017). A extensão do bioma Amazônia é de 7.413.827 km² entre oito países da América do Sul: Brasil, Bolívia, Peru, Equador, Colômbia, Venezuela, Guiana e Suriname, além do território da Guiana Francesa. Somam-se 33 milhões de habitantes na região, sendo 1,6 milhão de indígenas de 370 etnias. Ao todo, nove estados brasileiros fazem parte do bioma amazônico. São eles: toda extensão do Amazonas, de Roraima, do Acre e do Amapá; quase toda extensão do Pará e de Rondônia; parte do Mato Grosso, do Maranhão e do Tocantins.



Figura 1. Representação do bioma Amazônia na América do Sul.

Para esta pesquisa foi escolhida como área de estudo, a região conhecida como Amazônia Legal do Brasil. Essa área a Amazônia Legal que possui uma extensão territorial de 5.130.422 km². A Amazônia Legal do Brasil compreende os estados do

Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Roraima, Rondônia, Tocantins e, parcialmente, o estado do Maranhão ao oeste do Meridiano 44° (Figura 2). Dos seis grandes biomas existentes no Brasil, a Amazônia é o maior bioma brasileiro, abrangendo cerca de 40% do país. A área da Amazônia Legal Brasileira corresponde a 62% do território do Brasil. Essa região é caracterizada por uma atmosfera úmida de grande e intensa atividade convectiva que juntamente com ação de sistemas sinóticos influenciam o clima da região.

A Amazônia é formada pela associação de diversos ecossistemas. Sua importância é reconhecida no mundo todo pela sua extensão, biodiversidade e abundância em recursos biológicos, hídricos e minerais. Em 2000, a Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura – UNESCO declarou como patrimônio natural da humanidade as áreas de conservação da Amazônia (ARAGÃO et al., 2007). A Amazônia se destaca por ser: a região de maior biodiversidade do planeta; abrigar grandes reservas minerais e possuir um terço das reservas mundiais de florestas tropicais úmidas. Fazem parte desse bioma: (a) Floresta Amazônica: maior floresta tropical do mundo, (b) Bacia Amazônica: maior bacia hidrográfica do mundo, (c) Rio Amazonas: maior rio em extensão do mundo, e (d) Pico da Neblina: ponto mais alto do Brasil.

Os principais sistemas climáticos que ocorrem na Amazônia são:

- (1) Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), cujas oscilações latitudinais definem as estações seca e chuvosa (PEREIRA FILHO et al. 2018);
- (2) a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), atuando principalmente nas regiões sul e sudoeste da Amazônia (ESPINOZA et al., 2014); e
- (3) eventos de El Niño-Oscilação do Sul (ENOS), que são responsáveis pela variabilidade interanual da precipitação (YOON e ZENG, 2010).

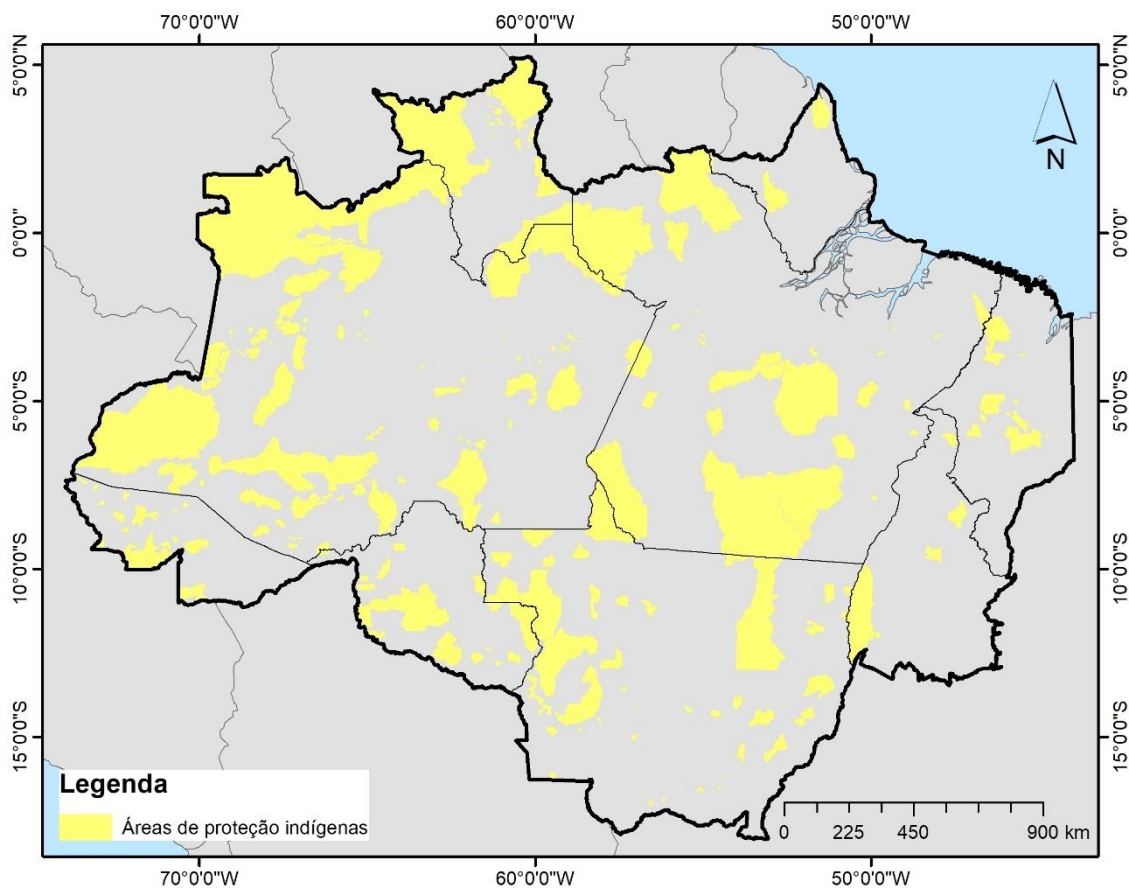


Figura 2. Localização geográfica da área de estudo – Amazônia Legal, e áreas de proteção indígenas.

Na área da Amazônia Brasileira está inserido o arco do desflorestamento, que compreende a região onde se encontram os maiores índices de desmatamento da região. É um território que vai do oeste do Maranhão e sul do Pará em direção a oeste, passando por Mato Grosso, Rondônia e Acre (CORDEIRO, 2021). As rodovias Belém-Brasília e Cuiabá-Porto Velho iniciaram o desenho desse arco, e atualmente corresponde ao território de 256 municípios que concentram aproximadamente 75% do desmatamento da Amazônia (OVIEDO et al., 2020). Para Rivero et al. (2009), o desmatamento nessa área está associado a processos endógenos de expansão das atividades agropecuárias, sendo essas atividades a principal causa desse desmatamento. A Figura 2 mostra ainda a distribuição espacial das áreas indígenas localizadas na Amazônia Legal. A Tabela 1 mostra a área geográfica dos estados da federação que compõem a Amazônia Legal, área indígena, e os percentuais das áreas indígenas em relação à área total e em relação à área indígena.

Tabela 1. Área geográfica dos estados da federação que compõem a Amazônia Legal, área indígena, e os percentuais das áreas indígenas em relação a área total e em relação a área indígena em 2020

Estados	Área total (km ²)	Área indígena (km ²)	% em relação a área total	% em relação a área indígena	% em relação a área da UF
Acre	166.806,90	24.874,09	0,48%	2,13%	14,91%
Amapá	148.155,35	12.243,55	0,24%	1,05%	8,26%
Amazonas	1.566.370,61	459.001,86	8,95%	39,30%	29,30%
Maranhão	285.347,33	24.956,80	0,49%	2,14%	8,75%
Mato Grosso	917.694,76	151.226,65	2,95%	12,95%	16,48%
Pará	1.288.755,08	314.792,19	6,14%	26,95%	24,43%
Rondônia	237.599,12	50.042,44	0,98%	4,28%	21,06%
Roraima	224.153,48	103.555,39	2,02%	8,87%	46,20%
Tocantins	295.539,07	27.295,53	0,53%	2,34%	9,24%
Total	5.130.422	1.167.989	22,77%		

Fonte: Adaptado de FUNAI, 2021.

De acordo com Silvano et al. (2000), pela proximidade da linha do Equador, o clima do bioma é equatorial, caracterizado como quente e úmido, com temperaturas médias anuais elevadas, com pouca variação, e bastante chuva por períodos de até 6 meses. A temperatura média do ar é entre 24 e 26 °C, a umidade é em torno de 80% e a precipitação média varia de 1.000 a 3.000 mm por ano (TASKER e ARIMA, 2016).

O relevo da região é na maior parte constituído por altitudes entre 100 e 200 metros acima do nível do mar. Uma exceção é o Pico da Neblina, com 3.014 m de altitude, sendo considerado o ponto mais alto do Brasil. O relevo dessa região é dividido da seguinte forma: (a) planície de inundação: região periodicamente alagada, (b) planalto amazônico: região com altura máxima de 200 m, e (c) escudos cristalinos: região com altura acima de 200 m. Com relação a hidrografia, a Amazônia possui a maior bacia hidrográfica do mundo, a bacia Amazônia, com 6.100.000 km² e mais de mil afluentes. A região detém cerca de 20% das reservas mundiais de água doce (ARAGÃO et al., 2007). Fazem parte da hidrografia amazônica os rios Amazonas, Araguaia, Nhamundá, Negro, Solimões, Tocantins, Trombetas, Xingu, Purus, Juruá, Japurá, Madeira, Tapajós e Branco.

No que tange, a fauna no bioma Amazônia, esta por sua vez é muito diversificada, sendo responsável por cerca de 20% da diversidade animal do planeta, com espécies exclusivas do local e muitas em risco de extinção (SILVANO et al., 2000). Como exemplos de animais da Amazônia, pode-se citar a onça-pintada, um dos maiores felinos do mundo, sucuri, uma das maiores cobras do mundo, pirarucu, um dos maiores peixes de água doce mundo, e mico-leão-dourado, um símbolo do Brasil e que hoje está entre as espécies ameaçadas de extinção.

4.2 Concepção Geral da Pesquisa

Para analisar a variabilidade espaço-temporal da precipitação e da temperatura da superfície e do uso e ocupação da terra, diversas bases de dados foram utilizadas nesta pesquisa, como imagens de satélite e dados de precipitação. Pretende-se com os conjuntos de dados propostos nesta pesquisa, comprovar os impactos nas áreas de proteção indígena e na variabilidade da precipitação no bioma Amazônia. A Figura 3 mostra o fluxograma das etapas que foram realizadas nesta pesquisa. Para tanto, dados meteorológicos e de satélites para validação da hipótese desta pesquisa.

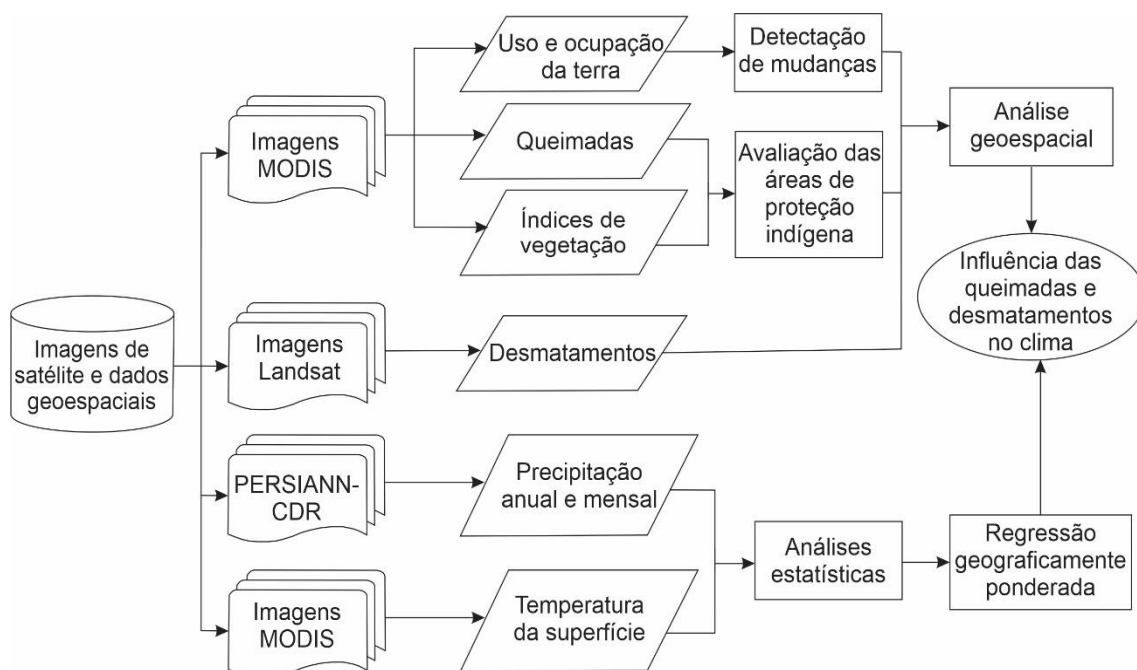


Figura 3. Fluxograma dos procedimentos metodológicos que foram utilizados nesta pesquisa.

4.3 Mapeamento do uso e cobertura do solo

Neste estudo, foram utilizadas imagens do *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* – MODIS, mais especificamente, o produto anual MCD12Q1, que mapeia o tipo de cobertura do solo, com resolução espacial de 500 m. Esse produto vem sendo usado para mapear o uso e cobertura da terra, conforme descrito em Sulla-Menashe e Friedl (2018), e Ferreira da Silva et al. (2020). Os produtos MCD12Q1 permitirão a comparação espacial e temporal consistente do uso e cobertura da terra para o bioma Amazônia ao longo do período entre 2001 e 2020 (TESTA et al., 2018). Esses produtos foram analisados espacialmente usando técnicas de estatística espacial em diferentes escalas espaciais (por estado e por bioma) e temporais (anual, quinquenal e decadal).

4.4 Analisando as mudanças no uso e cobertura da terra

Para analisar as mudanças na cobertura vegetal foi calculado o índice de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), usando produtos MODIS de refletância (MISHRA et al., 2021). As séries temporais de NDVI foram usadas para determinar a severidade temporal da perturbação da vegetação durante o período de 2001 a 2020 para o bioma Amazônia. Esse índice de vegetação é apropriado para rastrear distúrbios na vegetação tropical, conforme relatado por Li et al. (2014), Cortés-Ramos et al. (2020) e Konda et al. (2018).

Esse índice foi utilizado para caracterizar a variação do comportamento da vegetação ao longo do período estudado, pois estes índices são responsivos às mudanças na estrutura do dossel e apresentam bons resultados em relação à sensibilidade em áreas densamente vegetadas (WARDLOW e EGBERT, 2010). Para analisar o estado da vegetação, foram aplicados o NDVI MODIS (Eq. 1) (HUETE et al., 2011):

$$NDVI = \frac{N - R}{N + R} \quad (1)$$

no qual N e R são bandas de MODIS que representam a refletância de superfície nas bandas infravermelho próximo e vermelho, respectivamente.

Neste projeto, as áreas de mudanças foram identificadas subtraindo-se a imagem NDVI de uma data inicial por uma data final, conforme proposto por Cakir et al. (2006). Os valores de pixels dos dois índices nos anos inicial e final foram subtraídos (pixel por pixel) usando álgebra de mapa de ferramentas matriciais no ArcGIS 10.8®. A diferença é entendida como o dano florestal, causado pela associação entre fatores climáticos e

antrópicos, compreendido pela razão $NDVI_{\%}$, que são as mudanças relativas no sinal da vegetação durante o período estudado (Goto et al., 2015). As mudanças foram calculadas pela equação 2:

$$D_{NDVI} = NDVI_{2020} - NDVI_{2001} \quad (2)$$

em que $NDVI_{2001}$ representa a imagem NDVI no ano inicial (2001), $NDVI_{2020}$ representa a imagem NDVI no ano final analisado (2020). A proporção das mudanças do NDVI foram definidas pela equação 3:

$$NDVI_{\%} = D_{NDVI} / NDVI_{2001} \quad (3)$$

onde $NDVI_{\%}$ é a proporção de NDVI. Quanto maior for o valor de $NDVI_{\%}$ maior foram os danos determinados pelas mudanças no uso e cobertura da terra.

4.5 Mapeamento dos desmatamentos e queimadas usando o Google Earth Engine

Para diferenciar a influência dos fatores climáticos e antrópicos, nesta pesquisa foram utilizados dois produtos, um para o mapeamento dos desmatamentos e outro para a identificação de focos de queimadas no bioma Amazônia, como serão descritos a seguir. Em seguida, as imagens obtidas para o bioma Amazônia foram importadas para a plataforma Google Earth Engine (GEE). Neste trabalho, foram usados *scripts* desenvolvidos na plataforma GEE (GORELICK et al., 2017; ZHOU et al., 2020), para avaliar os desmatamentos e as queimadas no bioma Amazônia entre 2001 e 2020. Esses dados observados foram categorizados e analisados para medir a influência das mudanças do uso e cobertura da terra na variabilidade climática para longo prazo (2001–2020), para médio prazo (de 2001–2010 e de 2011–2020), quinquenais (período de cinco anos) e anuais.

4.6 Mapeamento dos desmatamentos

Para o mapeamento dos desmatamentos foram utilizados dados do produto Hansen Global Forest Change (HGFC) (HANSEN et al., 2013), que são informações globais usadas para mapear a cobertura florestal em todo o mundo. Esses dados estão disponíveis para download em http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest/download_v1.7.html. Este conjunto de dados é um projeto que utilizou dados florestais globais de séries temporais de imagens orbitais para caracterizar a

extensão da floresta global e a mudança de 2000 a 2025 (resultado da pesquisa de Hansen et al., 2013). Do qual foram extraídos os dados referentes ao período de estudo desta dissertação (2001 a 2020).

No produto HGFC, a cobertura florestal é definida como o tamanho do dossel para toda a vegetação com altura superior a 5 m. O conjunto de dados original foi dividido em blocos de $10 \times 10^\circ$, com sete arquivos por bloco (*tile*). As bandas fornecidas no conjunto de dados usados neste projeto foram: (a) cobertura florestal para o ano 2001 (*treecover2001*), que é definida como o dossel da vegetação com mais de 5 m, codificado com uma porcentagem por grade de saída célula com o intervalo variando de 0–100, e (b) desmatamentos detectados para cada ano, definido como a desagregação da perda total de floresta por ano de detecção, codificado como 0 (sem desmatamento) ou um valor de 1 a 20, representando o desmatamento detectados para o respectivo ano entre 2001 e 2020.

Em seguida, a camada *treecover2001* foi extraída, e a porcentagem de cada célula foi multiplicada pela área da grade da célula para obter a área de cobertura florestal dentro de uma célula da grade, uma vez que a cobertura florestal foi codificada como uma porcentagem por célula da grade de saída no intervalo de 0–100. A camada de perda de ano foi extraída para calcular a área desmatada anual de floresta para cada ano de 2001 a 2020 e, uma vez extraída, 20 imagens foram geradas representando os desmatamentos para cada ano específico.

4.7 Mapeamento das queimadas

No que tange o mapeamento das queimadas, os dados foram analisados a partir dos produtos MCD45A1 (ROY et al., 2008) entre 2001 e 2020, com resolução espacial de 1 segundo de arco por pixel. Esse produto tem sido amplamente utilizado para detecção de áreas queimadas em vários países (RUIZ et al., 2014; DE ARAÚJO e FERREIRA, 2015; CHUVIECO et al., 2019; MARCOS et al., 2019). O MCD45A1 é um produto mensal produzido a partir das entradas de refletância de superfície diária derivadas dos satélites Terra/MODIS e Aqua/MODIS. O algoritmo desse produto analisa a dinâmica de refletância de superfície diária para localizar mudanças rápidas, usa essa informação para detectar a data aproximada de queimada e mapeia apenas a extensão espacial de incêndios recentes.

4.8 Avaliação dos dados e comparação com os produtos DETER-B e PRODES

Para validar os resultados deste estudo usamos a comparação com dados do DETER-B (DINIZ et al., 2015) e PRODES (INPE, 2008). Essa comparação é possível, uma vez que, os dados devem poder ser padronizados, pois são usados diferentes sistemas de monitoramento com objetivos similares, para operar sensores, metodologias e área geográfica diferentes. Esses sensores foram comparados por Diniz et al. (2015).

Os dados temporais do PRODES 2013 referem-se ao período de julho a setembro, enquanto os dados do DETER-B variam temporariamente de março a setembro. Além do período de tempo distintos utilizados para o mapeamento, a disponibilidade de dados também difere, o que pode influenciar a capacidade de detecção de cada sistema e, em alguns casos, impedir a avaliação de determinada área da superfície terrestre no mesmo período. Essas dificuldades são agravadas pela limitação da cobertura do IRS1, próximo ao final de sua vida útil. A cobertura do IRS1 foi reduzida para 8 minutos por dia. Assim, uma área de mapeamento comum foi gerada (Figura 4) para tornar os dois conjuntos de dados comparáveis Goward et al. (2012).

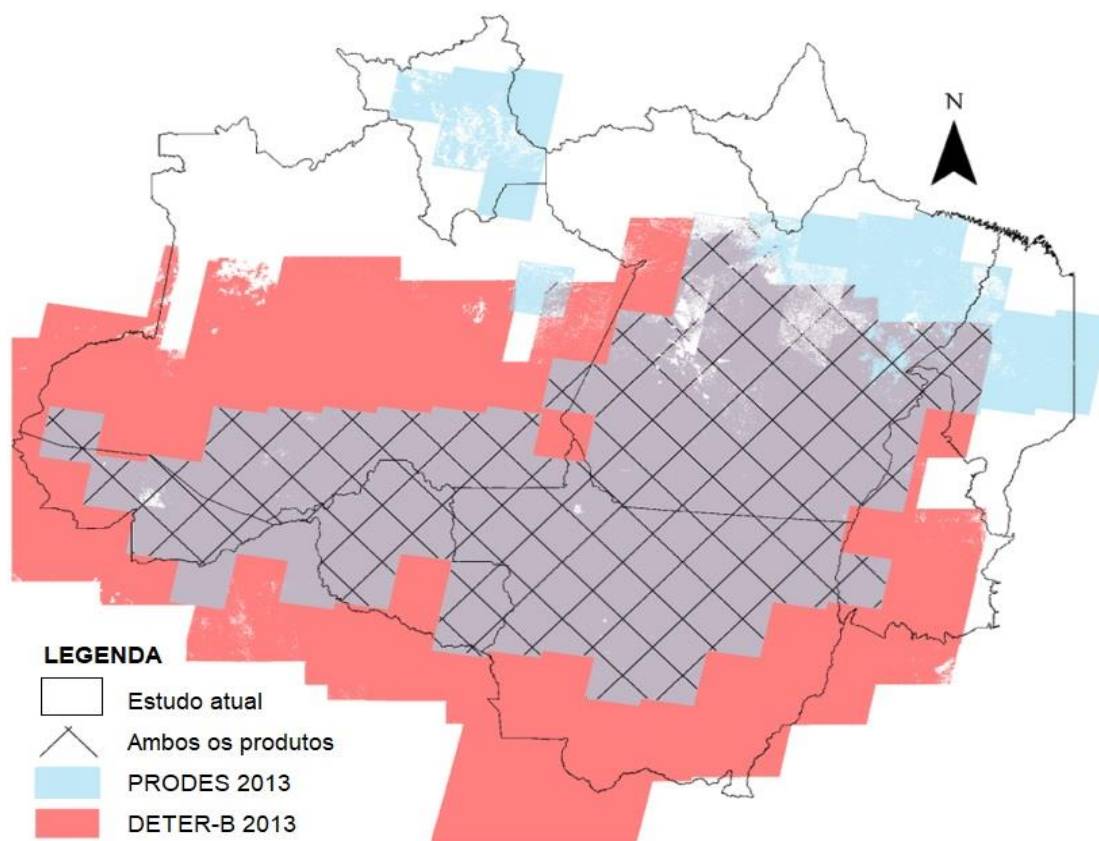


Figura 4. Área comum de mapeamentos do DETER-B, PRODES e área de estudo atual.

4.9 Variabilidade Climática: assimilação de dados meteorológicos obtidos por sensoriamento remoto

Nesta dissertação foram utilizados dois conjuntos de dados, um de precipitação e um de temperatura da superfície estimados por sensoriamento remoto, a saber: (a) *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks* (PERSIANN-CDR), e (b) temperatura da superfície obtidos por produtos do Aqua/MODIS e Terra/MODIS. Neste projeto, os dados do PERSIANN-CDR e de temperatura da superfície foram obtidos e processados usando a plataforma GEE, para o período de 2001 a 2020 e foram utilizados para analisar a variabilidade climática dos biomas estudados.

O PERSIANN-CDR foi desenvolvido pelo *Center for Hydrometeorology and Remote Sensing* (CHRS), da Universidade da Califórnia (ASHOURI et al., 2015). Esse produto é um conjunto de dados de precipitação diária com resolução espacial de 0,25°, gerado pela combinação do algoritmo PERSIANN e dados infravermelhos GridSat-B1, sendo atualizado regularmente com produtos mensais do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP). O PERSIANN-CDR é um algoritmo baseado em redes neurais artificiais adaptáveis, que estima precipitação usando dados de satélite, pluviômetros, radar terrestres, e informações topográficas da superfície (HSU et al., 1997). Esse conjunto de dados de precipitação diária engloba o período de 1983 até o presente momento e está disponível ao público em <http://chrsdata.eng.uci.edu>.

Os dados de temperatura da superfície que foram obtidos neste estudo são os produtos MOD11A1 e MYD11A1 derivados do sensor MODIS (Xing et al., 2021). Esses dados possuem resolução espacial de 1 km e temporal de 1 dia e estão disponíveis gratuitamente no Google Earth Engine. Após a aquisição de todos os dados, os produtos de temperatura da superfície foram convertidos do formato *Hierarchical Data Format* (HDF) para o formato *Tagged Image File Format* (TIFF) e os valores de temperatura convertidos da unidade Kelvin para graus Celsius. Para tanto, foram utilizados os softwares MODIS Reprojection Tool (MRT) e o ArcGIS 10.2®. Como esses produtos possuem diferentes resoluções espaciais foi necessária a interpolação de todas as bases espaciais em pixels com a mesma dimensão. Para analisar incompatibilidades entre as estimativas de precipitação e de temperatura da superfície por satélites, observações de

pluviômetros e dados de desmatamentos e queimadas, usaremos a abordagem pixel a ponto, conforme Thiemig et al. (2012), Mekonnen et al. (2021) e Viana et al. (2021). No método pixel a ponto, as séries temporais observadas e estimadas foram calculadas para comparar os vários produtos utilizados nesta pesquisa. Nesta pesquisa, a comparação entre os valores foi realizada interpolando os dados estimados e observados para corresponder a mesma resolução espacial.

4.10 Análises estatísticas e tendências espaço-temporais das mudanças climáticas e do uso e cobertura da terra

Em seguida, após a extração dos dados de desmatamento, queimadas e da variabilidade da precipitação e da temperatura da superfície foram analisadas por meio de estatística descritiva (média, erro médio padrão, desvio padrão, mínimo, mediana e máximo) e análises de tendências.

4.10.1 Estatística descritiva

Neste estudo foram utilizadas técnicas de estatística descritiva, como média, erro médio padrão, desvio padrão, valor mínimo, mediana, valor máximo, e coeficiente de variação, que permitirão analisar a variação espaço-temporal das variáveis analisadas neste projeto, tal como, perdas de cobertura vegetal e precipitação.

4.10.2 Análise Espacial da Precipitação

A análise espacial é o processo de manipulação de informações espaciais para extrair novas informações e significados a partir dos dados originais. Para realizar a distribuição dos dados de precipitação usando interpolação espacial foi utilizado o interpolador conhecido como Ponderação pelo Inverso da Distância (*Inverse Distance Weighted*), sendo expresso por:

$$f(x,y) = \frac{\sum_{j=1...N} w(d_j) v_j}{\sum_{j=1...N} w(d_j)} \quad (4)$$

sendo N o número de dados, v_j o valor do ponto j , d_j a distância entre os valores do ponto j , e $w(d)$ a função de ponderação. Para obter o valor de $w(d)$ é utilizada a equação abaixo:

$$w(d) = \begin{cases} \frac{1}{d_{min}^2} & \text{se } d_{min} \leq d_{min} \\ \frac{1}{d^2} & \text{se } d_{min} < d < d_{max} \\ 0 & \text{se } d > d_{max} \end{cases} \quad (5)$$

sendo d_{min} a distância mínima e d_{max} a distância máxima. O d_{min} impede que aconteçam valores com $d = 0$ e o d_{max} evita o uso de pontos muito distantes.

A interpolação usando o método Ponderação pelo Inverso da Distância é baseada na distância ponderada de pontos amostrais, ou seja, na superfície interpolada é criada um coeficiente de ponderação que controla a estimativa de valores para cada ponto amostral da base espacial. Esse método baseia-se na dependência espacial, isto é, supõe que quanto mais próximo estiver um indivíduo do outro, maior foi a correlação desse indivíduo com seus vizinhos. Dessa forma atribui-se maior peso para os indivíduos mais próximos do que para os mais distantes do ponto a ser interpolado. A principal vantagem desse método é a simplicidade e a ampla variedade de dados que podem ser aplicados (CARUSO e QUARTA, 1998). Para determinar a espacialização da precipitação foi usado o IDW usando o *software* ArcGIS 10.8®.

4.11 Análise espacial das queimadas e desmatamentos no clima

Para determinar a influência das queimadas e desmatamentos no clima foi aplicada a técnica de estatística de correlação espacial entre as variáveis climáticas precipitação e temperatura da superfície e as mudanças no uso e cobertura da terra usando o método Regressão Geograficamente Ponderada (RGP). Essa é uma técnica de modelagem local apropriada para dados espaciais com grau de dependência espacial (GEORGANOS et al., 2017). O RGP é uma desagregação espacial do modelo de regressão tradicional. Em um modelo estatístico tradicional simples, tentamos explicar um fenômeno usando uma variável explicativa.

O objetivo do RGP é examinar a existência de não estacionariedade espacial na relação entre uma variável dependente e como um conjunto de variáveis independentes. Uma apresentação completa do método RGP está disponível em Georganos et al. (2017). Pode-se argumentar. Esse modelo pode ser formalmente escrito como:

$$y_i = a + bx_i + \varepsilon_i, i = 1:n \quad (6)$$

onde y é a variável dependente, ou seja, o fenômeno a ser espacializado, x é a variável independente que influencia no fenômeno a ser espacializado, ε é o termo de erro, a e b são os parâmetros a serem estimados, e n é o número de amostras que correspondem às localizações espaciais. Para simplificar, chamamos esse modelo de “global”. Nesse método, a e b são estimados de forma que a soma dos quadrados dos resíduos do modelo seja minimizada. Além disso, os resíduos devem satisfazer os critérios de independência espacial. Por exemplo, podemos estimar o parâmetro b conforme mostrado na equação abaixo:

$$\hat{b} = \left(X^T X \right)^{-1} X^T Y \quad (7)$$

onde \hat{b} é a estimativa de b ; X é o vetor dos valores da variável independente; e Y é o vetor dos valores da variável dependente.

Na terminologia RGP, a vizinhança é chamada de “kernel” e a distância máxima do local de regressão i é chamada de “largura de banda”. É possível ter dois tipos de kernels, um “kernel fixo” onde a vizinhança é definida por um círculo cujo raio é a largura de banda, e um “kernel adaptativo” onde a vizinhança é definida pelo número de vizinhos mais próximos. O primeiro é mais apropriado para dados que são uniformemente distribuídos no espaço (como dados em grade) e o último é mais apropriado para dados com locais que são densos em algumas áreas e esparsos em outros lugares (como os centroides de limites administrativos). Cada tipo de kernel usa um esquema de ponderação diferente. Ambos os esquemas de ponderação foram usados neste estudo.

O benefício de uma função de ponderação contínua é que ela permite a estimativa de parâmetros em locais diferentes dos locais das observações. O tamanho da largura de banda descreve o limite de distância em que as observações próximas são levadas em consideração para ajustar um submodelo. Se a largura de banda for muito grande, o RGP se tornará o modelo global, uma vez que todas as observações seriam usadas em cada submodelo, impedindo assim a variação significativa dos parâmetros e aumentando o viés do modelo. Pelo contrário, se a largura de banda for muito pequena, os parâmetros serão menos enviesados, mas dependerão apenas de algumas observações e terão maior variância em suas estimativas e grandes erros padrão devido aos baixos graus de liberdade.

O RGP e o modelo local podem ser formalmente escritos da seguinte forma:

$$y_i = a(u_i, v_i) + b(u_i, v_i)x_i + \varepsilon_i, \quad i = 1:n \quad (8)$$

onde y_i se referem às coordenadas da localização i , e b são os parâmetros locais a serem estimados particularmente para a localização i . Para conseguir isso, um submodelo em torno de cada local de observação é definido e ajustado levando em consideração um subconjunto das observações originais.

A área de estudo do submodelo é uma vizinhança definida por um esquema de ponderação no qual as observações próximas têm um peso diferente de zero. Normalmente, o número de submodelos é igual ao número de observações. Ao calcular uma estimativa de parâmetro local para cada observação da área de estudo, é possível examinar a variabilidade potencial da relação entre a variável dependente e independente. Consequentemente, a equação 17 pode ser reescrita como:

$$\hat{b}(u_i, v_i) = \left(X^T W(u_i, v_i) X \right)^{-1} X^T W(u_i, v_i) y \quad (9)$$

onde \hat{b} é um vetor de estimativas locais de b $W(u_i, v_i)$ é uma matriz de pesos que denota os pesos das observações para o ponto de regressão i (submodelo i). Esses pesos são definidos por uma função contínua de distância. As observações mais próximas do local do ponto de regressão i têm pesos maiores, enquanto aquelas mais distantes têm pesos menores.

O tipo de ponderação é importante no RGP porque define a vizinhança. As funções de ponderação mais comumente usadas são gaussianas, semelhantes a gaussianas ou bi-quadradas, sendo calculada por:

$$w_{ij} = \exp \left[-1/2 \left(d_{ij} / b \right)^2 \right] \quad (10)$$

onde w_{ij} é o peso para a observação j que se refere ao submodelo para a localização i ; d_{ij} denota a distância euclidiana entre j e i ; e b é o tamanho da vizinhança.

No entanto, a maioria dos softwares que aplicam o RGP usa a função bi-quadrada, que é escrita por:

$$w_{ij} = \left[1 - \left(d_{ij} / b \right)^2 \right]^2 \quad \text{if } d_{ij} < b = 0 \text{ em outro lugar} \quad (11)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Mapeamento do uso e cobertura do solo

O desmatamento da Amazônia é uma causa de preocupação mundial devido à importância do ecossistema. Devido a esse problema, mapear o uso e ocupação da terra é fundamental para monitorar as mudanças na paisagem nesse bioma. A Tabela 2 apresenta área ocupada e a área percentual com o uso e ocupação da terra na Amazônia Legal em 2001, 2010 e 2020. Os resultados mostram que a classe Floresta foi que a que mais perdeu área nesses 20 anos de análise.

De acordo com os dados obtidos, essa classe passou de 63,3% para 59,3% da área total do bioma. As classes Agropecuária e Gramínea foram as que apresentaram os maiores aumentos. Esses resultados corroboram com os obtidos por Louzada e Ribeiro (2019). Esses resultados são fruto das mudanças na cobertura causados pelo avanço da agropecuária e a retirada de madeira da região. A Figura 5 mostra a espacialização do uso e ocupação da terra na Amazônia Legal entre 2001 e 2020. Percebe-se que as maiores mudanças ocorreram na porção leste e sul do bioma que são ocupadas majoritariamente pela classe agropecuária.

Tabela 2. Percentual e área ocupada com o uso e ocupação da terra na Amazônia Legal em 2001, 2010 e 2020.

Uso do solo	2001		2010		2020	
	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%
Floresta	3.568.80	63,3	3.395.11	60,3	3.343.28	59,3
Vegetação arbustiva	585.41	10,4	584.78	10,3	585.24	10,4
Agropecuária	960.70	17,0	1.091.87	19,4	1.064.15	18,9
Gramínea	391.30	6,9	433.05	7,6	506.84	9,0
Área alagada	43.45	0,7	43.89	0,7	48.64	0,8
Área urbana	3.22	0,0	3.24	0,0	3.28	0,0
Solo exposto	12	0,0	12	0,0	14	0,0
Água	76.490	1,3	77.43	1,3	77.92	1,3

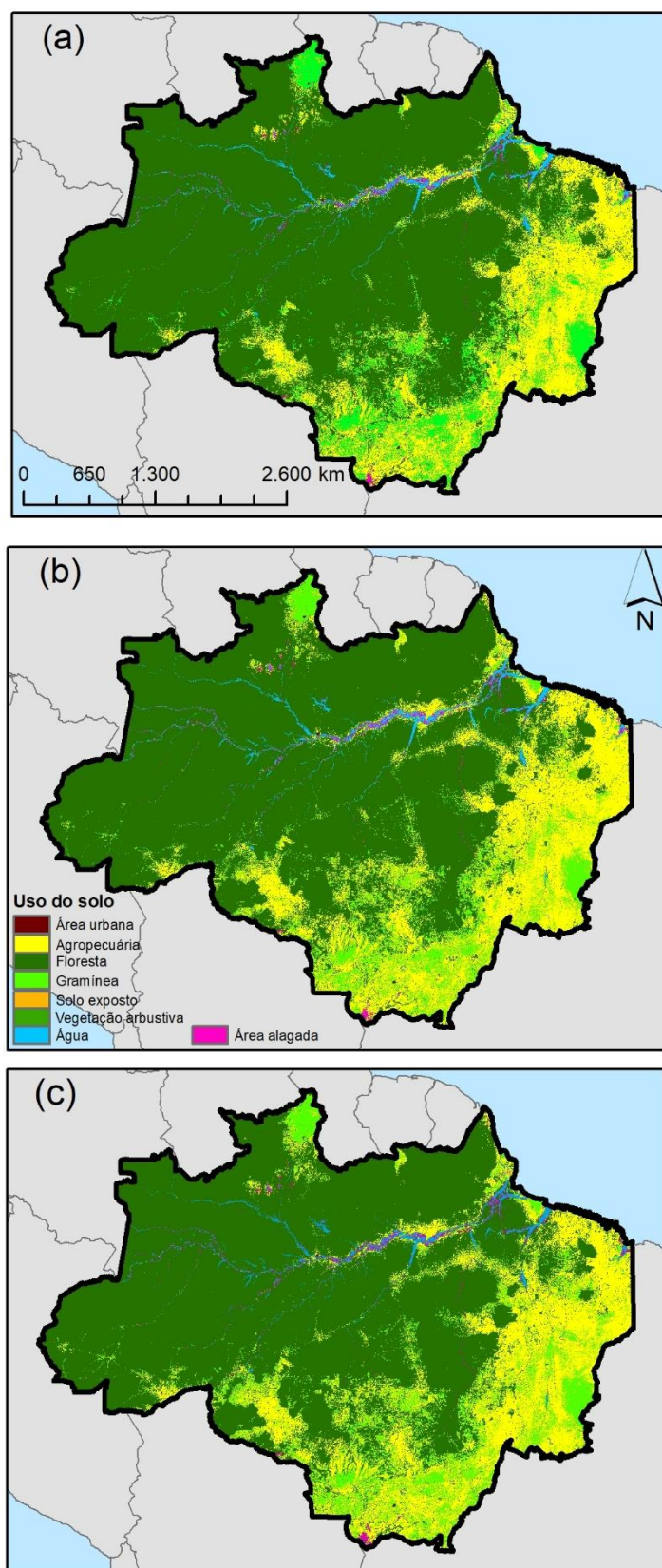


Figura 5. Distribuição geográfica do uso e ocupação da terra na Amazônia Legal em (a) 2001, (b) 2010 e (c) 2020.

5.2 Análise espaço-temporal das queimadas na Amazônia Legal

Queimadas e incêndios florestais são um tipo de ameaça ou perigo complexo. Queimadas referem-se às atividades que utilizam o fogo de forma controlada, por exemplo, para o manejo do uso da terra. Denominam-se incêndios florestais, ou incêndios da vegetação, a perda de controle sobre o processo de queima, ou quando há um processo de ignição natural em que o fogo se alastra (ANDERSON e MARCHEZINI, 2020).

O Brasil tem extensas formações vegetais ao longo do seu território que são afetadas por ocorrências de queimadas, necessitando de um monitoramento espaço-temporal e de estudos que relacionem a sua atuação nos biomas e nas áreas protegidas do país (DE JESUS et al., 2020). Os incêndios florestais têm uma vasta incidência ao longo dos variados biomas, das Unidades de Conservação, das áreas de preservação, das áreas de reflorestamento, das fazendas, ou até mesmo margens de estradas e proximidades de aglomerados urbanos, ocasionando, em muitos casos, diversos prejuízos ecológicos, paisagísticos e econômicos (COSTA et al., 2009), tornando-se imprescindível o conhecimento e acompanhamento destes eventos.

As queimadas no bioma Amazônia é um fenômeno que não é recente e vem continuamente degradando a vegetação e o solo desse bioma há várias décadas. Contudo, em 2019, o tema passou a ser mais frequente na mídia e nas redes sociais depois que foram divulgadas estatísticas sobre o aumento no número de incêndios na região. Cabe destacar que, em 21 de agosto, a hashtag #prayforamazonia ocupou o primeiro lugar mundial nos *trending topics* do Twitter, o que indica o interesse mundial no assunto. Diante desse cenário de extrema relevância para o planeta ações de organismos não-governamentais e estudos vêm sendo realizados para estudar os impactos das queimadas na Amazônia.

A queimada é a prática mais comum utilizada com o objetivo de liberação de uma fração de território para a atividade agropecuária, de fundamental importância para o PIB do Brasil. Com a queimada, no entanto, uma série de impactos ambientais são imediatamente percebidos, alguns com desdobramentos incalculáveis. Esses impactos, por sua vez, são medidos por meio alertas que vêm de satélites e órgãos de proteção ambiental.

A Tabela 3 apresenta as análises estatísticas das áreas de queimadas na Amazônia Legal para cada estado da federação no período entre 2001 e 2020. Os resultados mostram que os estados de Mato Grosso, Pará e Amazonas foram os que apresentaram as maiores áreas de queimadas. Os estados de Mato Grosso e Pará apresentam as maiores queimadas porque compõem majoritariamente área conhecida como arco do desmatamento (CORDEIRO, 2021). De acordo com Anderson et al. (2005), o estado do Mato Grosso pode ser considerado como um dos estados brasileiros mais importantes em relação ao número de focos de calor detectados. Para o ano de 2001, o percentual total de focos de calor foi de 23% e esse percentual vem aumentando desde então.

Tabela 3. Estatísticas das áreas de queimadas na Amazônia Legal para cada estado da federação no período entre 2001 e 2020

Estados	Área de queimadas						
	Média	Mínimo	Máximo	CV	Desvio padrão	Desvio médio	Erro médio padrão
Acre	370,38	8,95	3.059,89	1,80	666,41	346,43	149,01
Amapá	658,57	93,40	1.266,16	0,54	356,77	291,61	79,78
Maranhão	1.852,26	137,99	4.262,02	0,75	1.380,66	1.163,42	308,73
Amazonas	13.114,35	1.975,20	35.358,69	0,67	8.758,87	6.232,26	1.958,54
Mato Grosso	39.006,68	6.073,72	100.957,12	0,68	26.400,48	20.593,19	5.903,33
Pará	13.853,36	1.865,76	35.513,11	0,81	11.230,14	9.059,70	2.511,13
Rondônia	3.199,73	284,52	9.147,39	0,77	2.475,46	1.903,69	553,53
Roraima	1.734,50	101,57	6.769,83	0,89	1.552,33	1.058,79	347,11
Tocantins	26.429,35	7.766,33	67.463,64	0,62	16.419,99	12.121,38	3.671,62

A Tabela 4 mostra as áreas de queimadas na Amazônia Legal para cada estado da federação entre 2001 e 2020. Os resultados mostram que os anos de 2007 e 2010 foram aqueles que apresentaram as maiores áreas de queimadas na Amazônia Legal, com as áreas 233.401 km² e 247.562, respectivamente. Os estados de Mato Grosso e Pará foram aqueles que apresentaram os maiores focos de queimadas registrados pelos produtos MODIS, porque possuem extensas formações vegetais ao longo do seu território que são próprias para as atividades de agropecuária e mineração, necessitando, portanto, de monitoramento abrangente, políticas públicas de proteção e de estudos que relacionem a sua atuação no bioma (DE JESUS et al., 2020).

A distribuição anual das áreas queimadas no bioma estudado é mostrada na Figura 6. Os resultados mostram que os anos 2007, 2010, 2015, 2017, 2019 e 2020 foram

aqueles que apresentaram as maiores áreas de queimadas no período estudado. O bioma Amazônico foi bastante impactado pelas queimadas no período estudado. Esses resultados corroboram com os resultados por Araújo et al. (2012), com forte atividade de incêndios ao longo da transição Amazônia-Cerrado, no território do estado do Maranhão e Pará, decorrente do uso intensivo da terra nesta área a qual é conhecida como Arco do Desmatamento.

Observa-se que, espacialmente, que o estado do Amazonas tem baixa densidade de eventos de fogo na sua porção norte-oeste (apesar de já existir alguns locais com aumento da evidência de queimadas) enquanto o inverso é visto em toda a sua porção leste, com várias regiões consideradas com alta densidade. Tasker e Arima (2016) ao estudarem o regime de queimadas florestais no bioma Amazônia de 2004 a 2013, também identificaram uma maior quantidade de focos e de área queimada também estão na porção leste e sul, ao longo da divisa com o Cerrado, e no leste do estado de Roraima, espacialmente semelhante ao verificado no presente estudo. Além disso, Bedia et al. (2015) observaram que as projeções meteorológicas de incêndios e suas anomalias futuras de 2026 a 2045 indicaram que, no Brasil, estas áreas se assemelham com as áreas de maiores manchas de densidade verificadas nas ocorrências do presente estudo (de 2003 a 2017), com destaque ao bioma Cerrado e Caatinga tendo maiores magnitudes e intensidades das anomalias.

Na Figura 7 é possível identificar as ocorrências de queimadas totais na Amazônia Legal em áreas de proteção indígenas para o período analisado. Os resultados apontam que as áreas indígenas no Maranhão, Pará, Mato Grosso e Rondônia concentram as maiores ocorrências de queimadas em áreas protegidas no bioma Amazônia. Como já mencionado, o fogo é largamente utilizado em algumas fases do processo de desmatamento. O aumento do número de queimadas no período analisado, como demonstra nos mapas, é consistente com o aumento de áreas de degradação florestal detectadas pelo DETER-B e PRODES no mesmo período.

Tabela 4. Áreas de queimadas na Amazônia Legal para cada estado da federação entre 2001 e 2020.

Estado	Área de queimadas (km²)																			
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Acre	366,3	563,8	39,6	8,9	3.059,9	265,8	257,9	228,5	73,4	788,0	93,8	93,8	70,3	8,9	13,0	501,5	141,1	204,7	225,4	403,1
Amapá	1.090,8	1.024,0	192,8	306,5	753,7	940,0	412,9	975,5	1.255,7	478,4	642,4	642,4	471,5	93,4	170,2	1.266,2	664,8	582,8	872,7	334,9
Amazonas	1.011,4	1.197,2	138,0	157,2	4.066,4	2.243,0	2.321,3	1.970,5	787,0	3.925,9	1.309,6	1.309,6	420,0	339,9	218,4	2.770,7	2.531,3	2.308,2	3.757,6	4.262,0
Maranhão	8.470,1	15.728,9	2.654,5	1.975,2	21.234,5	8.497,4	35.358,7	10.792,2	10.112,7	29.829,1	12.904,7	12.904,7	12.188,6	3.149,1	4.096,2	13.741,5	23.461,2	7.837,4	14.769,1	12.581,3
Mato Grosso	46.573,2	59.808,2	15.058,2	13.937,6	50.128,0	33.488,8	88.985,3	36.977,7	15.264,9	00.957,1	24.063,8	24.063,8	25.098,4	6.073,7	6.521,2	40.095,7	47.867,9	22.593,4	47.664,9	74.911,6
Pará	11.263,9	23.565,8	2.104,9	2.830,6	28.168,3	13.140,6	35.513,1	15.716,7	11.945,6	35.107,7	7.835,9	7.835,9	4.298,4	1.887,3	1.865,8	7.902,6	30.892,8	3.741,9	12.843,3	18.606,1
Rondônia	2.344,3	5.607,0	493,5	303,5	9.147,4	4.846,5	5.831,3	2.444,2	1.367,3	7.685,8	2.992,5	2.992,5	943,9	284,5	296,6	3.599,3	2.617,7	2.279,1	3.444,9	4.472,4
Roraima	1.543,8	1.038,2	296,5	116,1	1.123,0	1.385,2	3.025,5	1.034,0	2.010,6	1.326,6	1.143,5	1.143,5	1.579,6	129,1	101,6	4.006,5	1.967,8	2.320,3	6.769,8	2.628,8
Tocantins	25.114,6	32.822,7	9.598,4	7.766,3	34.488,9	17.574,4	61.695,4	26.079,6	10.012,2	67.463,6	23.697,9	23.697,9	20.830,3	8.188,5	9.545,3	33.503,0	40.105,6	13.833,0	32.004,0	30.565,2
TOTAL	97.778	141.356	30.576	27.402	152.170	82.382	233.401	96.219	52.829	247.562	74.684	74.684	65.901	20.154	22.828	107.387	150.250	55.701	122.352	148.765

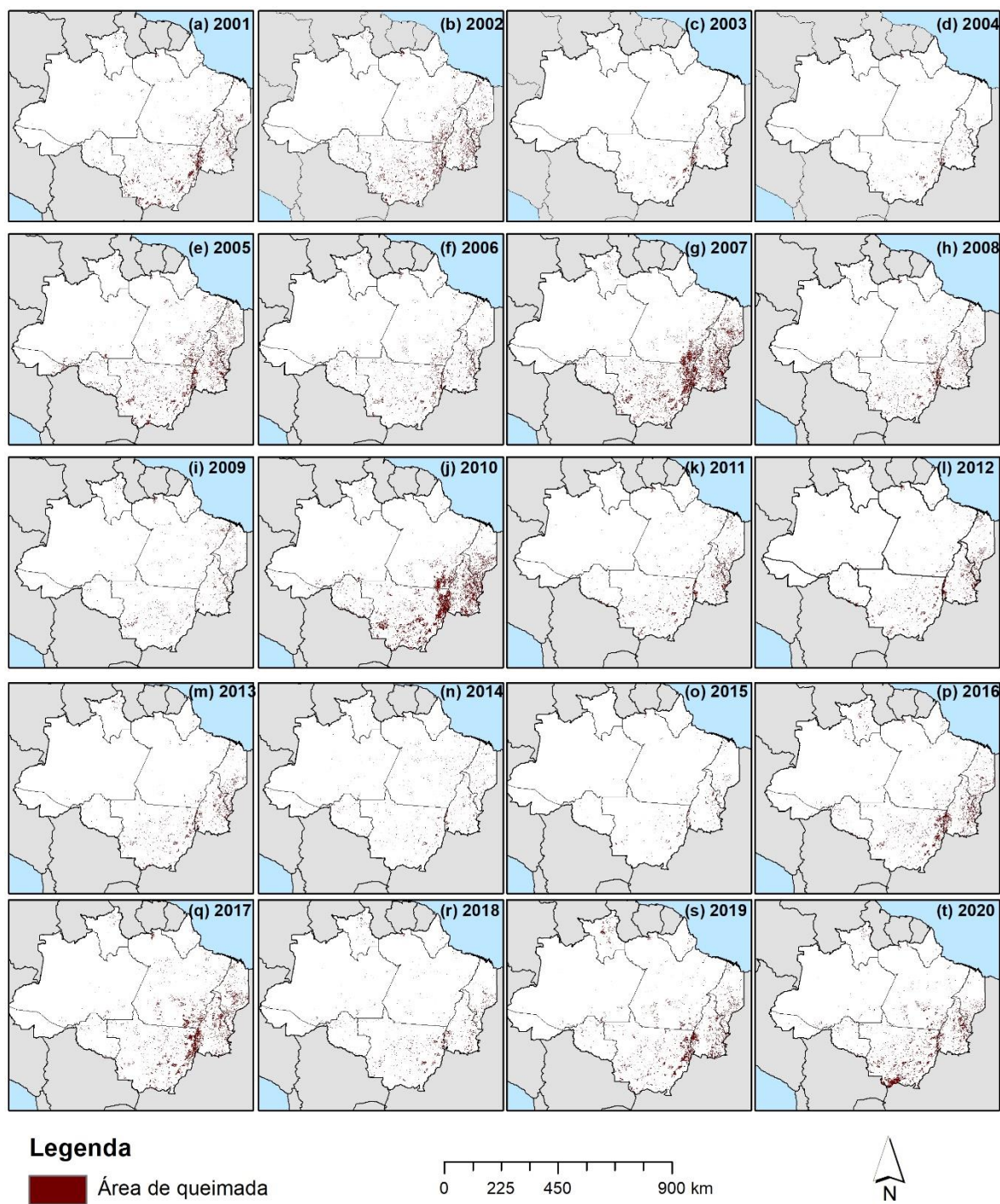


Figura 6. Distribuição geográfica das queimadas por estado da federação para cada ano na Amazônia Legal, no período entre 2001 e 2020.

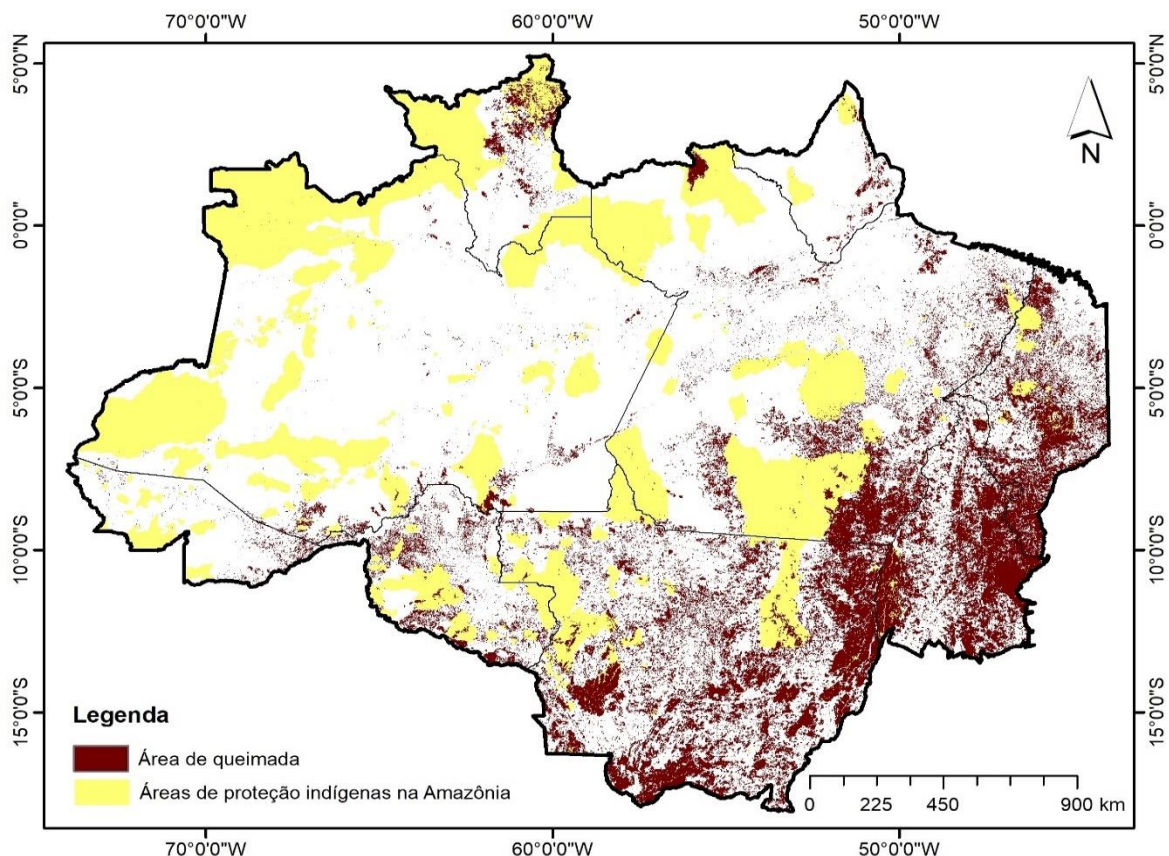


Figura 7. Espacialização da ocorrência de queimadas totais na Amazônia Legal em áreas indígenas para o período de 2001 a 2020.

É possível observar que as Terras Indígenas ainda atuam como uma barreira no avanço do desmatamento e dos focos de queimadas. Soares-Filho et al., (2020) apontam que as áreas protegidas, incluindo as terras indígenas desempenham papel importante na proteção da floresta tropical e consequentemente no sistema climático mundial. No entanto, desde 2019, o atual governo brasileiro vem reduzindo a proteção ambiental dessas áreas. Promovendo a desregulamentação, que enfraquece as leis e padrões ambientais (Ferrante e Fearnside, 2019) e apoia emendas de lei que minimizam os direitos indígenas, como autorização de mineração dentro de TIs. Observa-se também que a grande maioria dos focos de queimadas concentram-se no arco do desmatamento. Região onde a fronteira agrícola avança em direção à floresta amazônica.

5.3 Análise espaço-temporal do desmatamento na Amazônia Legal

O desmatamento na Amazônia é um dos problemas ambientais mais graves do Brasil e que afeta diretamente esse bioma. A Tabela 5 apresenta as áreas de desmatamentos em km² na Amazônia Legal para cada estado da federação entre 2001 e 2020. O levantamento aponta que a área de floresta destruída em 2001 foi de 97.778 km² e em 2020 foi de 148.765 km², isto é, um aumento de 52%. Os resultados mostram que os estados de Pará e Mato Grosso foram aqueles que apresentam as maiores áreas desmatadas na região, com áreas desmatadas de 172.314 km² e 144.128 km², respectivamente.

A Tabela 6 apresenta as análises estatísticas das áreas de desmatamentos na Amazônia Legal para o período quinquenal entre 2001 e 2020. O período quinquenal compreendido entre os anos de 2016 a 2020 foi aquele com a maior área de desmatamento médio no bioma (254.465 km²), seguido do quinquênio 2011–2015 que apresentou desmatamento médio de 210.731 km².

O desmatamento acumulado no período 2016–2020 é o pior no período analisado (254.465 km²), 92% maior do que no período 2005–2010, e 82% maior do que no período 2001–2005. Segundo os dados obtidos neste estudo, os anos de 2016 e 2017 foram os mais preocupantes no que tange os desmatamentos na Amazônia Legal, no qual apresentaram áreas de 49.863 km² e 42.508 km², respectivamente.

Dentre os principais motivos do desmatamento na Amazônia, pode-se destacar que, as queimadas ou os incêndios florestais que acontecem na região são fruto de ações humanas. O principal intuito é ampliar o espaço para plantação ou criação de animais. Outro fator são as atividades das madeireiras, no qual muitas empresas que utilizam madeira para diversos fins, exploram de maneira ilegal o ambiente. Dessa maneira, diversas árvores são cortadas e os responsáveis não são punidos. Por fim, pode-se destacar as atividades de pecuária, como a expansão das atividades voltadas para a criação de animais como um dos principais motivos do desmatamento na Amazônia. Dessa maneira, muitas empresas e grandes latifundiários desmatam o local para expandir o negócio.

Também merecem destaques a especulação fundiária (grilagem) e a impunidade de crimes ambientais. A grilagem é gerada pela falta de fiscalização, o estímulo da grilagem na Amazônia tem sido um dos problemas associados à invasão de terras públicas. A impunidade de crimes ambientais, como o desmatamento ilegal realizado por

diversas empresas tem colaborado com a devastação da floresta amazônica. Muitos crimes ambientais seguem sem punição por falta de uma legislação mais perene e fiscalização local.

De acordo com Anderson e Marchezini (2020), nesse bioma há severos retrocessos políticos, com alguns exemplos notórios, como a criação do novo código florestal em 2012 e a redução das Unidades de Conservação. Além disso, destaca-se a diminuição de pessoal especializado em entidades ambientais como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) e o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Pode-se destacar ainda a retomada de grandes obras: a construção de obras na região realizada sem planejamento para diminuir os impactos do aumento de pessoas é um dos grandes problemas a ser observado. Como exemplo, podemos citar a construção da hidrelétrica de Belo Monte, inaugurada em 2011.

Tabela 5. Áreas de desmatamentos em km² na Amazônia Legal para cada estado da federação entre 2001 e 2020.

Estado	Área de desmatamentos (km²)																			
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Acre	800,8	813,4	446,4	788,6	1.991,6	480,5	422,2	645,1	426,4	505,4	459,6	762,0	613,1	781,7	619,5	1.129,0	1.105,8	1.078,6	1.071,6	1.144,8
Amapá	155,8	155,0	155,0	109,0	185,7	157,1	145,7	123,0	154,4	247,9	118,6	170,4	235,6	178,9	230,3	189,6	461,9	471,8	176,2	138,2
Amazonas	903,3	1.100,7	1.149,6	1.054,4	1.957,0	1.734,7	990,3	1.065,1	1.435,5	1.686,4	978,7	1.825,5	1.429,0	1.668,2	1.801,3	6.203,2	3.014,0	2.190,8	2.432,1	2.759,4
Maranhão	844,1	1.595,5	1.069,5	2.054,4	1.775,7	1.860,0	2.162,5	1.949,5	1.119,8	2.535,4	1.311,4	2.214,3	2.589,8	3.439,4	2.812,8	7.359,8	4.524,8	3.722,3	2.550,8	3.343,1
Mato Grosso	7.862,4	12.330,7	13.250,7	14.694,2	8.877,2	6.366,4	5.717,3	4.765,9	2.390,6	5.992,2	4.031,6	6.301,9	2.929,3	4.685,4	4.166,4	7.337,8	10.874,0	5.592,4	5.468,5	10.492,9
Pará	7.282,0	8.764,5	7.023,6	10.904,7	10.554,2	8.615,1	7.517,4	7.906,5	5.365,5	6.341,8	4.896,1	6.280,2	5.178,1	6.812,4	5.857,0	18.543,2	15.900,3	10.039,6	8.584,8	9.946,4
Rondônia	3.075,9	4.734,2	3.719,8	3.714,0	4.531,3	3.365,0	1.816,1	1.451,4	1.092,3	2.347,4	1.780,7	1.838,0	943,6	2.276,5	1.954,6	3.175,6	3.372,7	2.262,7	2.243,7	2.437,1
Roraima	642,8	370,2	504,2	291,5	230,7	332,0	511,6	394,6	436,6	258,3	218,3	233,8	225,8	372,5	389,2	3.810,9	537,3	572,4	1.832,6	403,7
Tocantins	933,1	876,2	995,9	1.339,9	1.064,0	921,6	1.434,7	766,2	875,6	883,8	767,5	1.282,2	1.363,6	1.806,0	1.809,6	2.114,1	2.717,3	1.935,3	1.547,5	1.549,8
TOTAL	22.500	30.740	28.315	34.951	31.167	23.832	20.718	19.067	13.297	20.799	14.563	20.908	15.508	22.021	19.641	49.863	42.508	27.866	25.908	32.215

Tabela 6. Análise estatística das áreas de desmatamentos na Amazônia Legal para o período quinquenal entre 2001 e 2020.

	Média				Desvio médio				Coeficiente de variação			
	2001	2006	2011	2016	2001	2006	2011	2016	2001	2006	2012	2017
	2005	2010	2015	2020	2005	2010	2015	2020	2005	2011	2016	2020
Desmatamentos	210.731	139.394	132.334	254.465	32.952	27.392	23.801	73.979	0,16	0,20	0,18	0,29

Como bem ressalta Louzada e Ribeiro (2019), cabe destacar que o desmatamento na Amazônia Legal tem criado graves consequências para o meio ambiente e para a população do Brasil. Nesse sentido, pode-se destacar: (a) alteração do funcionamento dos ecossistemas, (b) alterações climáticas do mundo e do clima regional, (c) prejuízos econômicos e sociais para o ambiente, (d) impacto na fertilidade do solo e nos ciclos hidrológicos, (e) aumento dos gases que colaboram com o efeito estufa, (f) crescimento das taxas de nascimentos prematuros, e (g) aumento de mortes e doenças respiratórias nas pessoas e nos animais.

De acordo com os dados da Tabela 7 referentes às áreas de desmatamentos em km² na Amazônia Legal, entre 2004 e 2013, a taxa de desmatamento foi diminuindo e chegou a baixar cerca de 80% nesse período. No entanto, em 2014 o problema voltou a ser uma triste realidade. As principais causas desse aumento foram: impunidade de crimes ambientais, retrocessos de políticas ambientais, o lucro decorrente de grilar terras públicas, e grandes obras que aceleram as ameaças.

Diante desse cenário degradante, algumas soluções são possíveis para evitar ou mesmo impedir o desmatamento no bioma Amazônia. Dentre todas as ações e programas para combater o problema urgente do desmatamento, pode-se destacar o chamado “desmatamento zero”. Essa proposta foi lançada no ano de 2012 para acabar ou diminuir o desmatamento no Brasil, pois, além do bioma Amazônia, muitas outras florestas sofrem com o desmatamento no território nacional, como o Cerrado e a Caatinga (SANTOS et al., 2020). De acordo com Greenpeace (2021), no ano de 2016, foi elaborado um documento entregue ao Congresso para criação de uma proposta de lei. A ideia central é que o desmatamento zero seja uma realidade em 2030. Dentre as principais ações do desmatamento zero, estão: (a) implementação de políticas públicas efetivas de conservação ambiental, (b) aumento da fiscalização ambiental, (c) coibição da grilagem de terras, (d) cumprimento do Código Florestal, (e) fim do desmatamento pela agropecuária, (f) melhoria nas práticas agropecuárias, (g) criação de Unidades de Conservação Ambiental, (h) demarcação de áreas indígenas protegidas pela lei, (i) apoio aos usos sustentáveis da floresta, (j) redução e boicote dos mercados associados ao desmatamento, e (k) maior engajamento da população.

A Figura 8 mostra a variabilidade da área desmatada total para cada ano na Amazônia Legal entre 2001 e 2020. Podemos analisar os resultados dessa figura dividindo em três períodos. O primeiro se refere aos anos de 2001 a 2010 quando novas políticas públicas foram empregadas pelo Governo Federal para diminuir os desmatamentos na

Amazônia. O segundo período de 2009 a 2015 durante o Governo da Presidente Dilma Rousseff uma manutenção dos menores valores de desmatamentos.

A principal redução ocorreu na primeira fase do programa (2004–2008) impulsionada pela criação de Unidades de Conservação e Terras Indígenas. Desde 2014, quando o desmatamento atingiu seu menor valor, especula-se uma retomada do crescimento nas taxas anuais. Como a contenção do desmatamento exigiu ações coletivas e envolveu diferentes esferas de atividade, a intensificação das taxas de desmatamento resulta de uma ampla gama de forças e contextos geográficos e históricos. Entretanto, após 2016, essa região volta a ter aumento considerável de área desmatada, como podemos conferir atualmente (G1, 2021).

Ainda que tenha tido o apoio de grande parte da população e de algumas entidades, há ainda um longo caminho para se percorrer até que a lei vire realidade. Tendo em vista que a atual gestão do Governo Federal vem praticando atos e ações contrárias à conservação da floresta amazônica. Essas ações visam a destruição da Amazônia e a continuidade dessas ações continuará trazendo consequências irreversíveis para o meio ambiente e a vida da população que habita a região como os indígenas, os quilombolas e os ribeirinhos do bioma Amazônia.

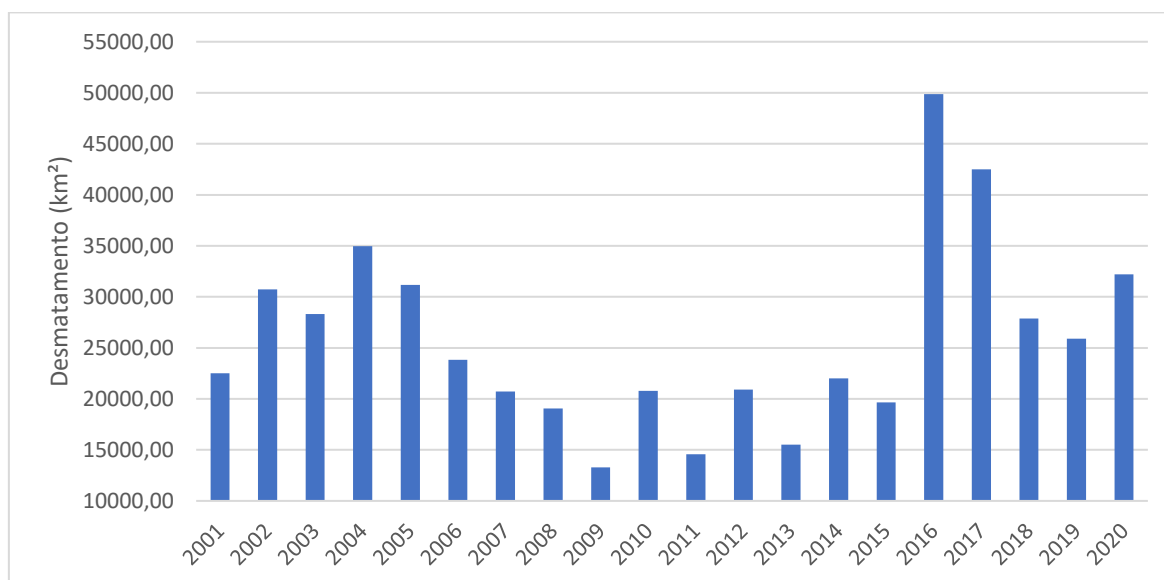


Figura 8. Variabilidade da área desmatada total para cada ano na Amazônia Legal entre 2001 e 2020.

Tabela 7. Estatísticas das áreas de desmatamentos na Amazônia Legal para cada estado da federação no período analisado

Estados	Desmatamentos						
	Média	Mínimo	Máximo	CV	Desvio padrão	Desvio médio	Erro médio padrão
Acre	804,3	422,2	1.991,6	0,47	376,78	270,47	84,25
Amapá	198,0	109,0	471,8	0,50	99,10	65,75	22,16
Amazonas	1.868,9	903,3	6.203,2	0,63	1185,70	734,27	265,13
Maranhão	2.541,7	844,1	7.359,8	0,58	1476,75	1000,88	330,21
Mato Grosso	7.206,4	2.390,6	14.694,2	0,48	3481,60	2806,88	778,51
Pará	8.615,7	4.896,1	18.543,2	0,40	3465,36	2434,32	774,88
Rondônia	2.606,6	943,6	4.734,2	0,41	1065,58	883,54	238,27
Roraima	628,5	218,3	3.810,9	1,31	825,03	440,09	184,48
Tocantins	1.349,2	766,2	2.717,3	0,39	524,04	413,52	117,18

No atual processo global de agropecuária, as áreas de pastagem e agricultura tornam-se elementos centrais na disputa por questões ambientais. O desmatamento talvez seja o desafio mais relevante e complexo no debate sobre a conciliação entre conservação e desenvolvimento regional na Amazônia. Na Figura 9 pode-se identificar a espacialização das áreas desmatadas totais na Amazônia Legal no período compreendido entre 2001 e 2020. Os resultados mostram que os estados do Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia, e Tocantins são aqueles que apresentaram as maiores áreas totais desmatadas. A Figura 10 mostra a espacialização das áreas desmatadas por estado da federação para cada ano na Amazônia Legal, no período entre 2001 e 2020.

A Tabela 8 mostra a comparação entre as áreas desmatadas descritas no estudo atual, PRODES, e DETER-B. Os resultados mostram que este estudo obteve melhor ajuste aos dados do PRODES, enquanto a comparação com os dados do DETR-B ficou prejudicada porque a área de estudo entre as três metodologias foi diferente. Cabe destacar que o estudo atual abrangeu toda a Amazônia Legal, enquanto as demais metodologias usaram dimensões diferentes deste estudo. Assim, pode-se ressaltar que a metodologia nesta pesquisa é promissora e pode ser ajustada para uma obter uma melhor acuraria com os demais produtos.

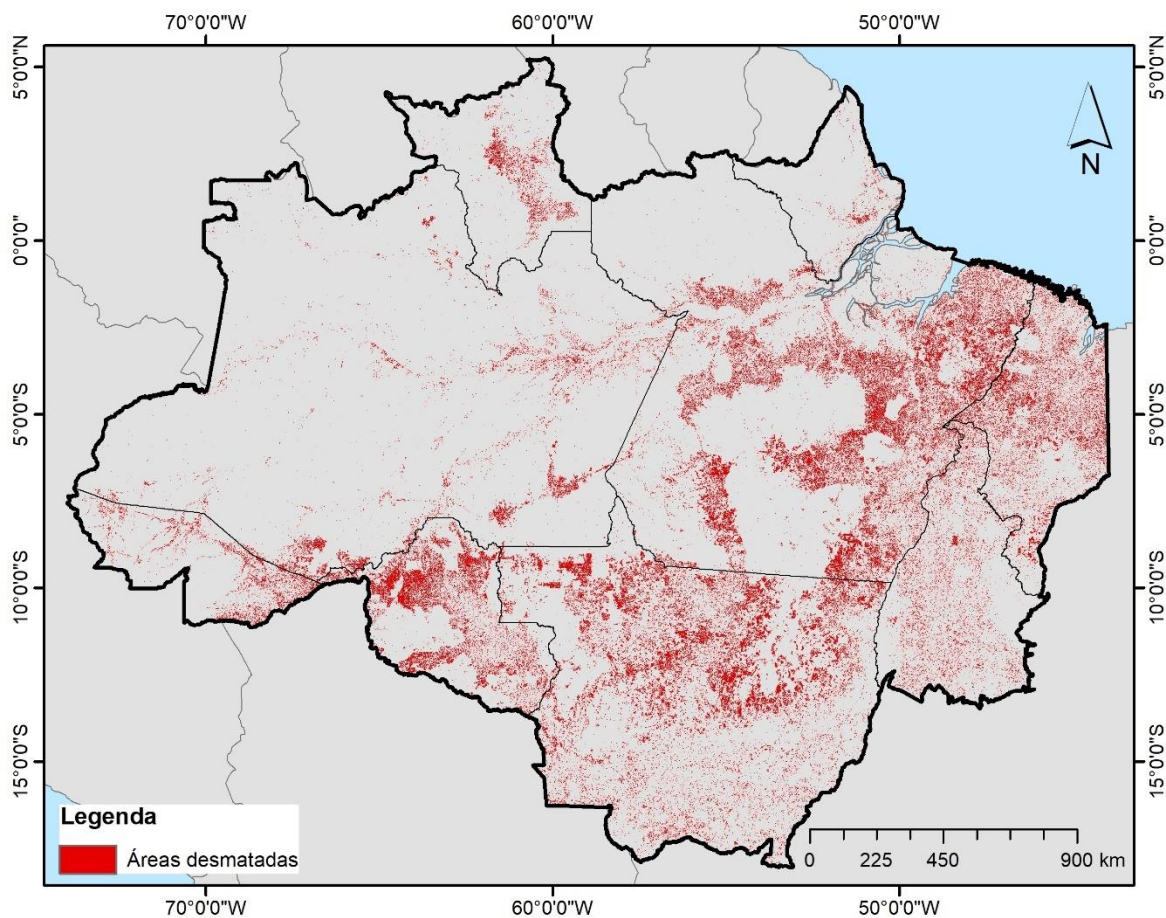


Figura 9. Espacialização das áreas desmatadas totais na Amazônia Legal no período compreendido entre 2001 e 2020.

Tabela 8. Comparação entre as áreas desmatadas entre o estudo atual, PRODES, e DETER-B

Estados	Estudo atual	PRODES	DETER-B	Diferença Estudo atual/ PRODES %	Diferença Estudo atual/ DETER-B %	Diferença PRODES/ DETER-B %
Acre	16.086,10	15.628,70	30.611,20	2,93	-47,45	-106,17
Amazonas	37.379,20	35.094,10	41.980,40	6,51	-10,96	-159,41
Maranhão	50.834,90	7.978,80	217,50	537,12	23.272,37	-97,69
Mato Grosso	44.127,80	103.661,60	126.741,20	39,04	13,72	184,56
Pará	72.313,40	178.293,70	137.223,10	-3,35	25,57	-113,12
Rondônia	52.132,60	86.914,30	67.585,30	-40,02	-22,86	75,03
Tocantins	26.983,90	2.718,00	540,30	892,79	4.894,24	-81,76

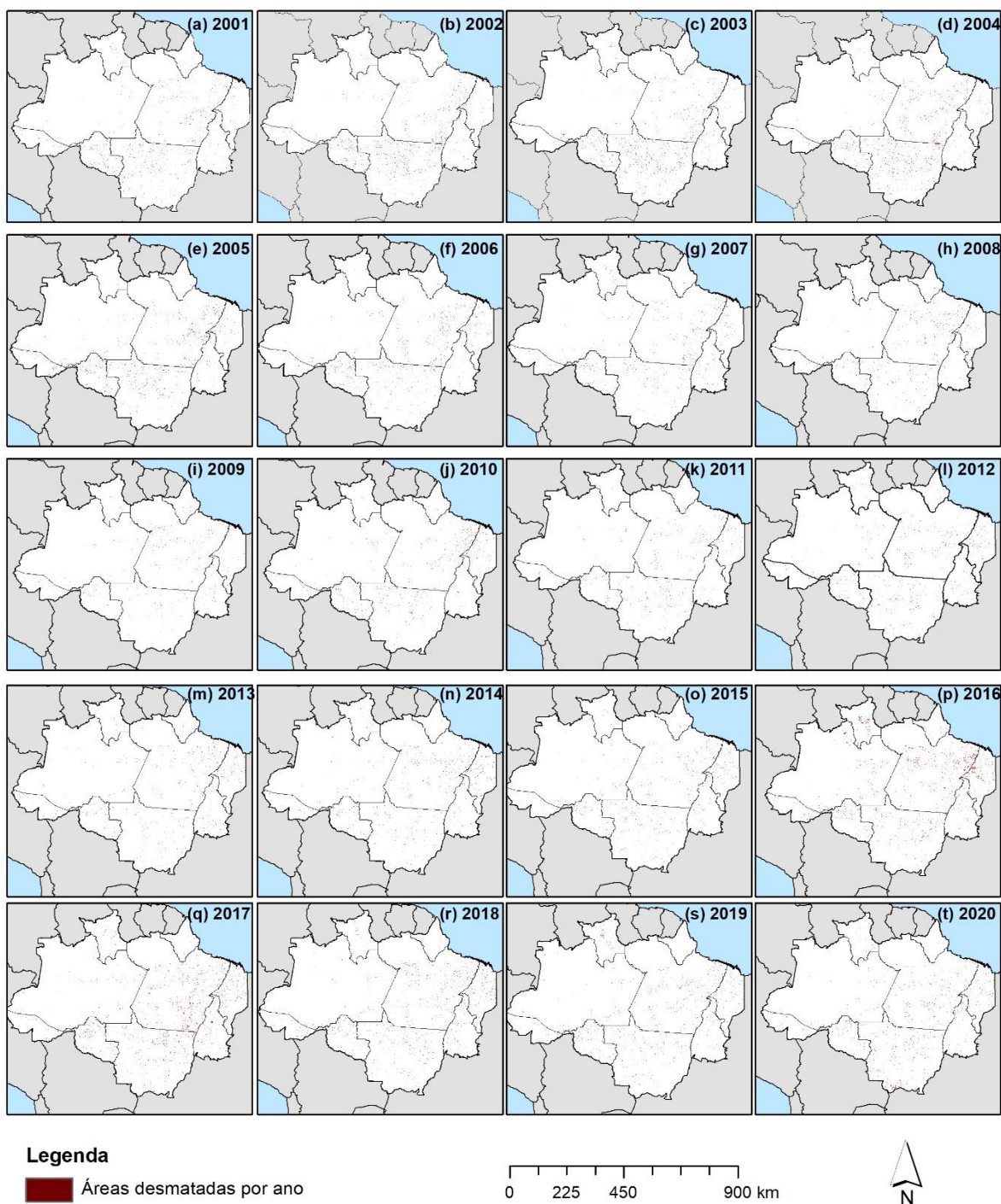


Figura 10. Espacialização das áreas desmatadas por estado da federação para cada ano na Amazônia Legal, no período entre 2001 e 2020.

5.4 Índices de Vegetação

A determinação de índices de vegetação a partir de sensores multiespectrais de satélite e técnicas de sensoriamento remoto ajudam a detectar mudanças na paisagem em múltiplas escalas. Os índices espectrais, como o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), variam de -1 a 1. Os valores negativos do NDVI correspondem a áreas com superfícies de água, estruturas construídas, rochas, nuvens e neve; o intervalo 0,1 – 0,2 corresponde ao solo descoberto; e as plantas terão sempre valores positivos entre 0,2 e 1. A vegetação saudável e densa deve estar acima de 0,5, e a vegetação escassa cairá dentro do intervalo 0,2 – 0,5. (ROUSE et al., 1973). O NDVI permite monitorar a saúde da vegetação (HUETE et al., 1999) e também pode ser usado para delimitar períodos úmidos e secos (HUETE et al., 1994), diagnosticar o uso e cobertura da terra (HUETE et al., 1997), e avaliar mudanças nos padrões espectrais de ambientes preservados.

A Tabela 9 mostra as estatísticas descritivas do NDVI para a área de estudo. Os resultados das análises estatísticas do NDVI mostram que a maior média foi para o ano de 2001, com valor médio de 0,71 e a menor média do NDVI foi para o ano de 2020, que obteve valor de 0,67. Com relação aos valores de máximo e mínimo do NDVI, apresentou-se valores considerados não muito baixos, de -0,2 em todos os anos. A imagem do ano de 2020, apresentou o maior valor de máximo (0,99) e a imagem do ano de 2010 foi a que apresentou o menor valor de máximo (0,94). Com relação aos valores mínimos de NDVI, os valores negativos indicam a incidência de áreas com presença de água, ocorrência de lagos, rios ou áreas parcialmente inundadas. Os valores de máximo de NDVI representam a ocorrência de vegetação mais densa, com maior vigor de desenvolvimento vegetal, corroborando com Silva et al. (2016), que encontrou valores de -0,30 e -0,33 para lagos e valores de 0,75 e 0,78 para áreas com vegetação irrigada, para imagens dos anos de 2000 e 2001 respectivamente, em estudos sobre o balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM, em áreas situadas nos estados de Pernambuco e Bahia.

O resultado do desvio padrão do NDVI apresentou altos valores, variando entre 0,12 para a imagem do ano de 2001 e 0,118 para o ano de 2020. Esses valores de desvio padrão, podem ser explicados pela homogeneidade fenológica da vegetação em grande parte da área de estudo, como florestas, vegetações muito densas, rios, lagos e pequenas áreas antropizadas. Luz et al. (2021) estudando a análise dos efeitos do déficit hídrico na resposta temporal do NDVI no estado do Mato Grosso, concluíram que a variação do NDVI, está

relacionado diretamente com as variações na disponibilidade hídrica da região, tendo influência nas condições fenológicas da vegetação.

Tabela 9. Estatística descritiva do NDVI para a área de estudo

Anos	Mínimo	Máximo	Variação	Média	Desvio padrão
2001	-0,20	0,98	1,18	0,71	0,12
2010	-0,20	0,94	1,14	0,69	0,12
2020	-0,20	0,99	1,19	0,67	0,11

A Figura 11 apresenta a distribuição geográfica do NDVI para a Amazônia Legal para os anos de 2001, 2010 e 2020. A representação dos valores de NDVI para os anos de 2001, 2010, e 2020 foram apresentadas na forma de intervalos, divididas em seis classes, a saber: com valores menores que zero representados pela cor vermelha; entre 0 e 0,25 pela cor alaranjada; entre 0,25 e 0,50 pela cor amarela; entre 0,50 e 0,70 pela cor verde claro; e valores de NDVI maior que 0,70 são representados pela cor verde escuro.

Os resultados mostram que as fronteiras leste e sul são aquelas que apresentam os menores valores de NDVI, em virtude dessas porções apresentarem as vegetações menos vigorosas. A classe representada no mapa com a cor vermelha, representa ambientes com presença de corpos hídricos, a cor alaranjada representa o ambiente de solo exposto, ambientes com predominância de gramíneas e vegetações rasteiras são representadas pela cor amarela, o verde claro representa a ocorrência de vegetação menos densa e a vegetação mais densa é representada pela cor verde escura, corroborando com Silva et al. (2016), que encontrou resultados semelhantes. Há uma predominância na ocorrência da classe representada pela cor verde clara em todas as imagens, revelando uma predominância na ocorrência de vegetação densa para nesses anos.

A Figura 12 apresenta a distribuição geográfica da diferença do NDVI para a Amazônia Legal entre os períodos (a) 2001 a 2010 e (b) 2010 a 2020. Os resultados mostram que o período de 2001 a 2010 apresentou as maiores diferenças no NDVI, principalmente na porção sul da área de estudo. O período 2010-2020 apresentou as maiores perdas na porção leste e em pequenas áreas nas porções sul e oeste da área analisada.

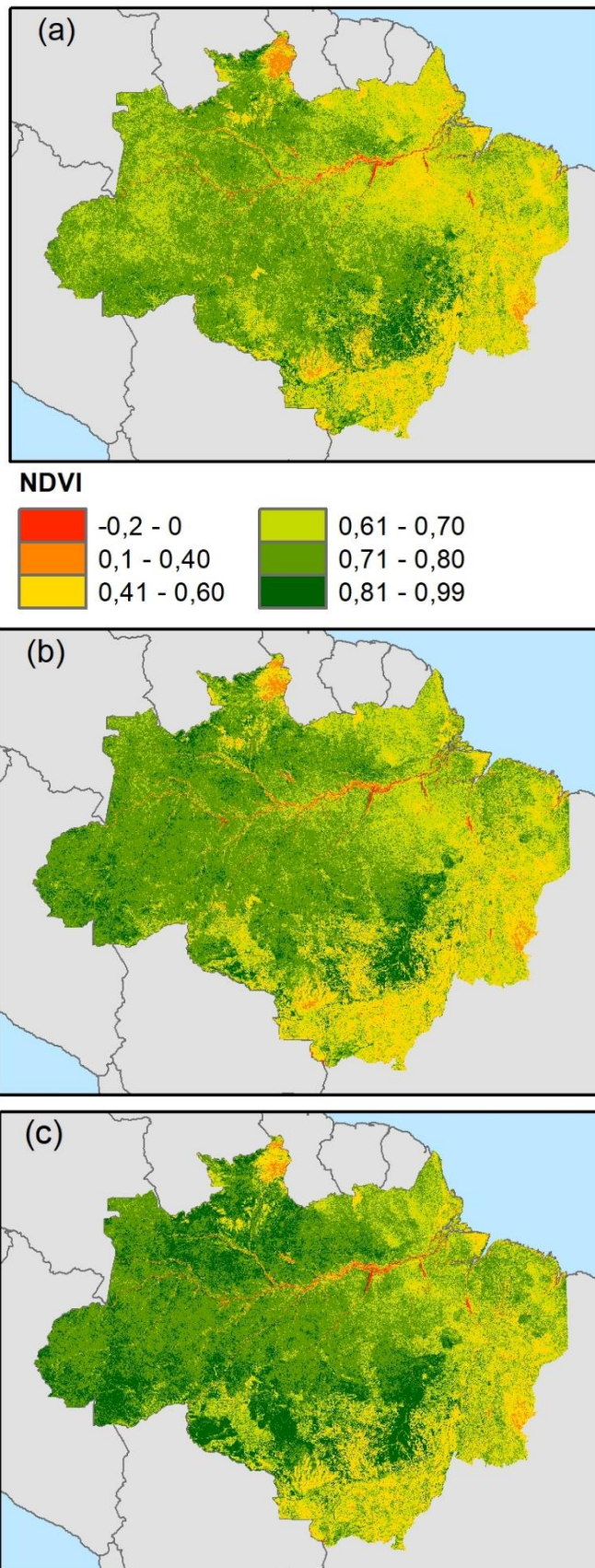


Figura 11. Distribuição geográfica do NDVI para a Amazônia Legal em (a) 2001, (b) 2010 e (c) 2020.

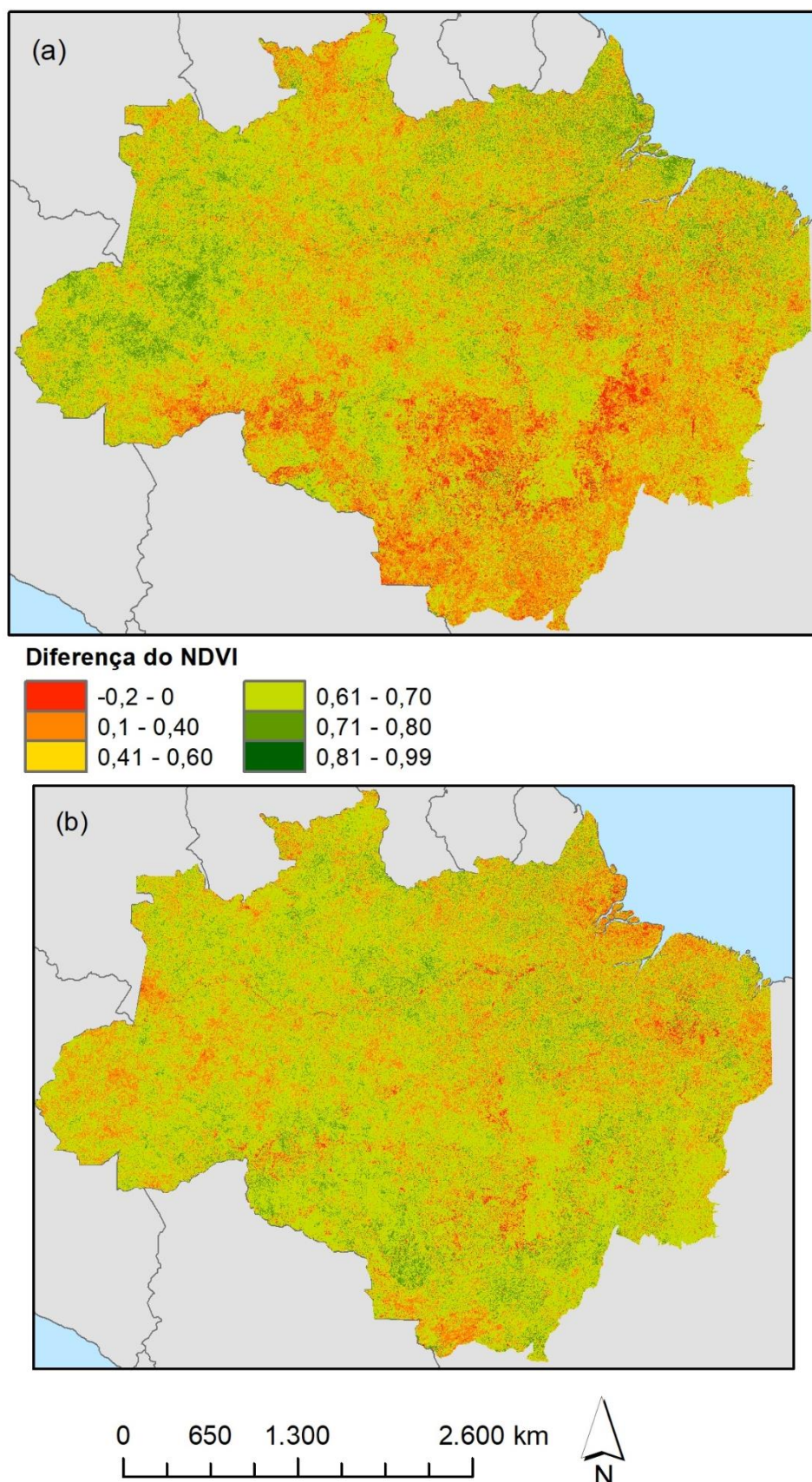


Figura 12. Distribuição geográfica da diferença do NDVI para a Amazônia Legal entre os períodos (a) 2001 a 2010 e (b) 2010 a 2020.

5.5 Variabilidade da Precipitação e da Temperatura da Superfície

O tipo e uso cobertura do solo desempenham papel decisivo para a temperatura da superfície continental, sobretudo, para regiões de clima úmido. Nesse sentido, os desmatamentos da Amazônia é um dos mais importantes objetos de preocupação ambiental das últimas décadas e têm impacto direto na temperatura da superfície. Os elevados índices de desmatamento têm despertado preocupação entre os cientistas acerca do cenário climático futuro. Aliado ao processo de expansão agrícola acelerado, a Amazônia, por sua grande área, é um ecossistema altamente susceptível em escalas regionais e globais.

A Figura 13 apresenta a distribuição geográfica das temperaturas máximas em cada ano na Amazônia Legal para os anos entre 2001 e 2020. Nota-se que as temperaturas máximas ocorrem em sua grande maioria nas porções sul e leste que possuem vegetação menos densa tipicamente das classes agropecuária e vegetação arbustiva. Os resultados mostram que os valores de temperaturas máximas apresentam um aumento durante o período estudado.

A Figura 14 mostra a distribuição geográfica das temperaturas médias anuais para cada ano na Amazônia Legal para os anos entre 2001 e 2020. O comportamento da temperatura média é similar ao das temperaturas máximas. Nas últimas décadas, a Amazônia vem sofrendo sérias ameaças à sua resiliência em resposta às mudanças climáticas globais, que poderão tornar a região gradativamente mais quente e seca, podendo atingir patamares de não conseguir manter uma vegetação de grande porte (FEARNSSIDE, 2010). Nesse contexto, a ocorrência cada vez mais frequente de extremos climáticos é um dos panoramas mais divulgados pelos relatórios do Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014).

A Figura 15 apresenta a variabilidade anual da área da temperatura média anual na Amazônia Legal para os anos de 2001 a 2020. Pode-se notar que há uma leve diminuição na tendência da área ocupada pelas temperaturas 27-28°C (que é a de maior ocorrência na área de estudo). Nota-se que o período de 2013 a 2016 a área apresentou uma diminuição das temperaturas médias, enquanto no período subsequente apresentou novamente um aumento. Deve-se destacar que a classe 31 a 35°C apresentou um leve aumento mostrando uma tendência do aumento das temperaturas médias. Outro destaque é o aumento da área ocupada pela classe de 13 a 20°C entre o período 2013 a 2016.

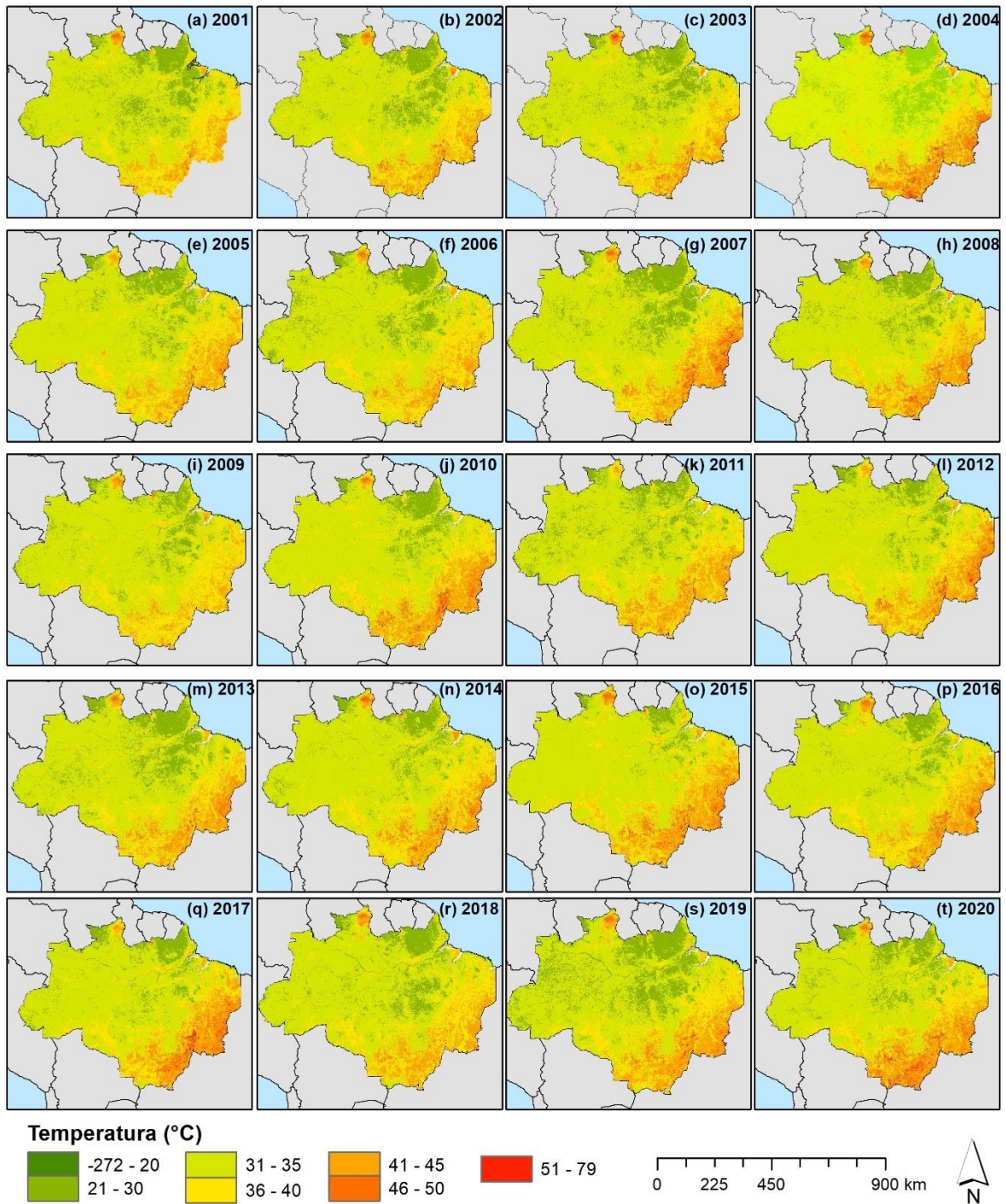


Figura 13. Distribuição geográfica das temperaturas máximas em cada ano na Amazônia Legal para os anos entre 2001 e 2020.

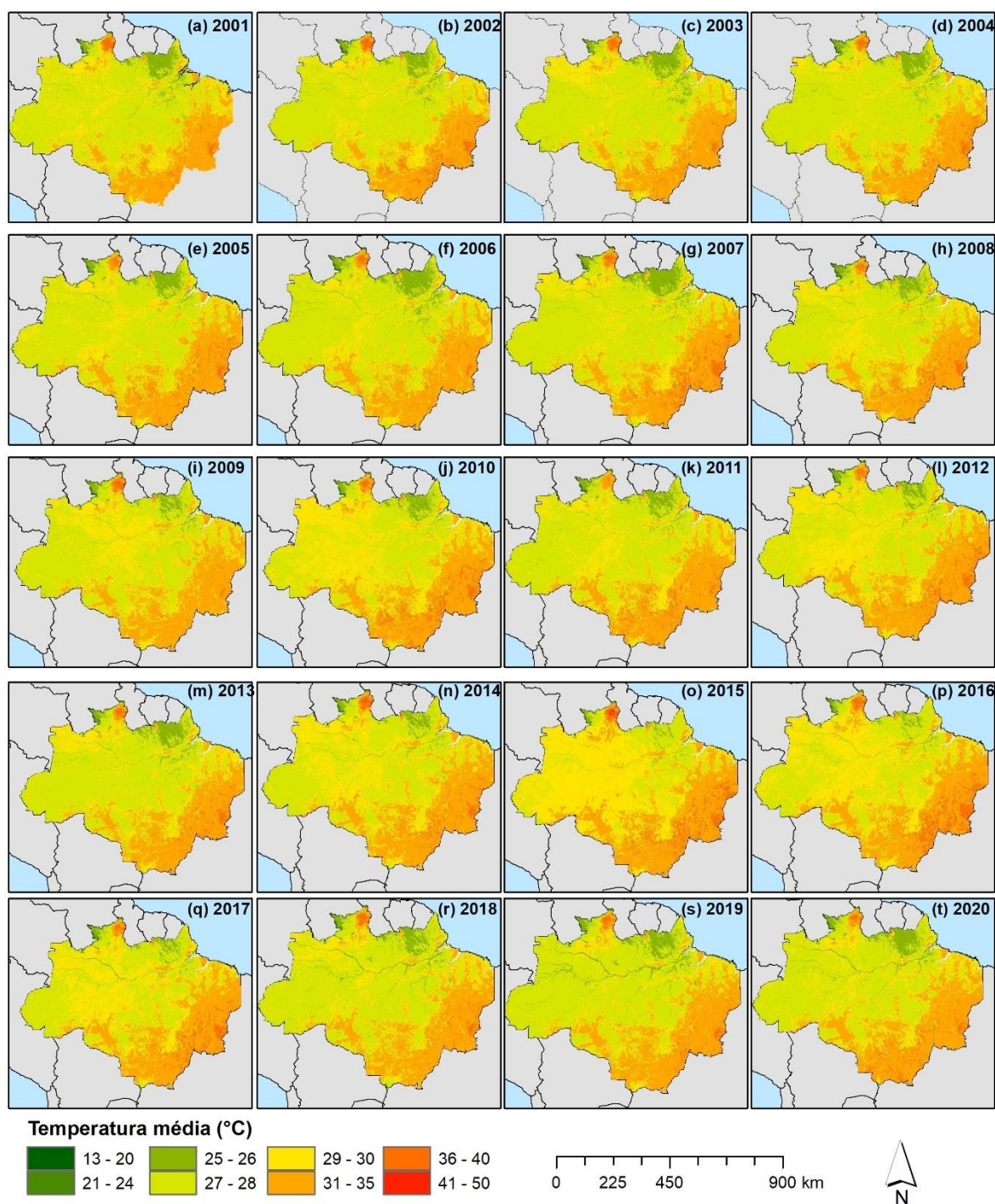


Figura 14. Distribuição geográfica das temperaturas médias anuais para cada ano na Amazônia Legal para os anos entre 2001 e 2020.

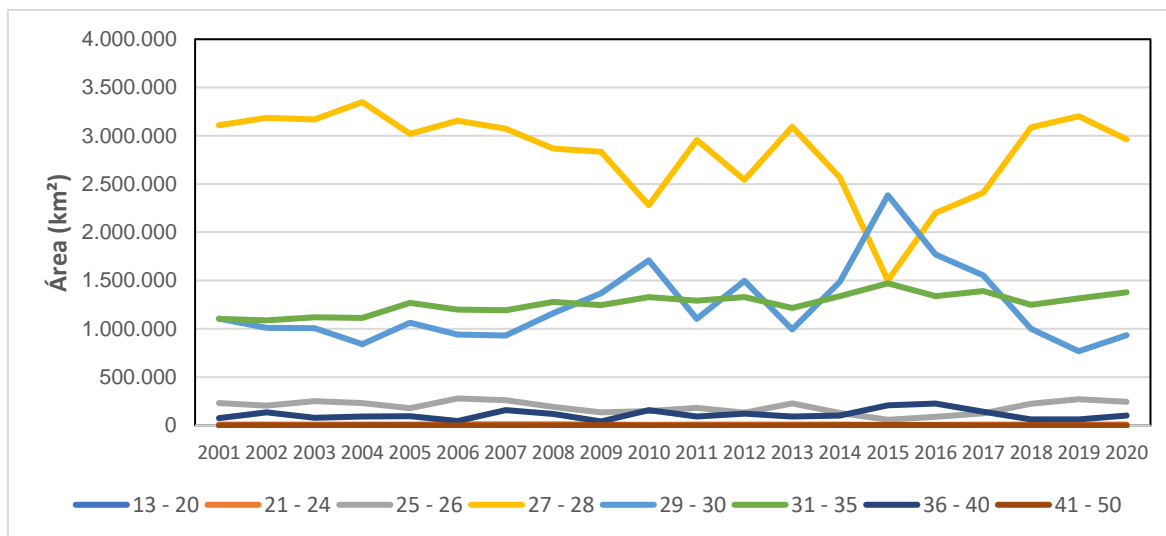


Figura 15. Variabilidade anual da área da temperatura média anual na Amazônia Legal para os anos de 2001 a 2020.

Na Tabela 10 pode-se constatar as estatísticas da temperatura máximas anuais na Amazônia Legal para cada estado da Federação para o período quinquenal de 2001 a 2020. Os resultados mostram que as maiores temperaturas médias ocorreram no estado de Mato Grosso e que houve um aumento de 29,17°C para 36,00°C, seguido do estado do Maranhão que apresentou temperaturas médias de 27,86°C em 2001 e 36°C em 2020.

Tabela 10. Estatísticas da temperatura máximas anuais na Amazônia Legal para cada estado da federação para o período quinquenal de 2001 a 2020

Estados	2001–2005		2006–2010		2011–2015		2016–2020	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Acre	25,56	1,08	31,94	1,37	31,87	1,37	31,70	1,42
Amapá	20,28	31,70	25,14	39,58	25,76	39,67	25,36	39,60
Amazonas	25,39	0,89	31,89	1,10	31,90	1,05	31,49	0,98
Maranhão	27,86	23,01	35,64	28,84	36,17	28,92	36,00	28,89
Mato Grosso	29,17	3,33	37,12	4,16	37,65	4,36	37,94	4,56
Pará	22,55	26,01	28,55	32,57	28,76	32,59	28,75	32,60
Rondônia	26,99	1,86	34,50	2,61	34,63	2,81	34,57	2,78
Roraima	26,66	3,69	33,03	4,25	32,87	4,14	33,51	4,46
Tocantins	31,76	1,97	40,56	2,49	40,83	2,71	41,40	2,75

A Figura 16 mostra a precipitação média anual para a Amazônia Legal para o período entre 2001 e 2020. Os resultados do estudo mostram que a Amazônia apresenta precipitação média anual de aproximadamente 2300 mm anuais. Sabe-se, contudo, que esse valor não é uniforme, apresentando variações entre as porções oriental, central e ocidental da região. A precipitação é causada por vários mecanismos de larga, meso e microescalas. Em larga escala pode-se destacar a Zona de Convergência Intertropical (ARRAUT e SATYAMURTY, 2009), que é formada pela convergência dos ventos alísios de nordeste e sudeste que acontece próxima ao Equador terrestre devido à baixa pressão nessa faixa longitudinal. Outro fator que impacta a precipitação na região é a Alta da Bolívia, que se forma devido à convergência do ar em baixos níveis (850 hPa) e sua posterior divergência em altos níveis (200 hPa). Que recebeu esse nome por se formar na área da América do Sul correspondente ao país de mesmo nome (SILVEIRA et al., 2017). A Tabela 11 apresenta as análises estatísticas da precipitação por estado da Amazônia Legal entre 2001 e 2020.

A Figura 17 apresenta a distribuição temporal da precipitação média por estado entre 2001 e 2020. Os resultados no gráfico mostram uma tendência de diminuição nas precipitações médias em todos os estados da Amazônia Legal. Esses resultados atestam para que as mudanças no uso e ocupação da terra advindas das queimadas e desmatamentos estão influenciando gradativamente no regime pluviométrico dessa região. A porção extrema oeste do estado do Amazonas é aquela que permanece com menor alteração da precipitação. Isso se deve porque essa porção da Amazônia Legal é a que possui o melhor estágio de conservação da floresta Amazônica.

As Figuras 18a–b apresentam as precipitações médias anual e mensal para a Amazônia Legal entre 2001 e 2020. Essa figura mostra que os valores da precipitação na área de estudo apresentam-se em sua grande maioria dentro dessa normal provisória. Para os meses mais chuvosos na região (dezembro, janeiro, fevereiro, março, e abril) as médias observadas estavam acima do normal e no caso dos meses de julho a setembro, foram os que apresentaram as médias abaixo da normal.

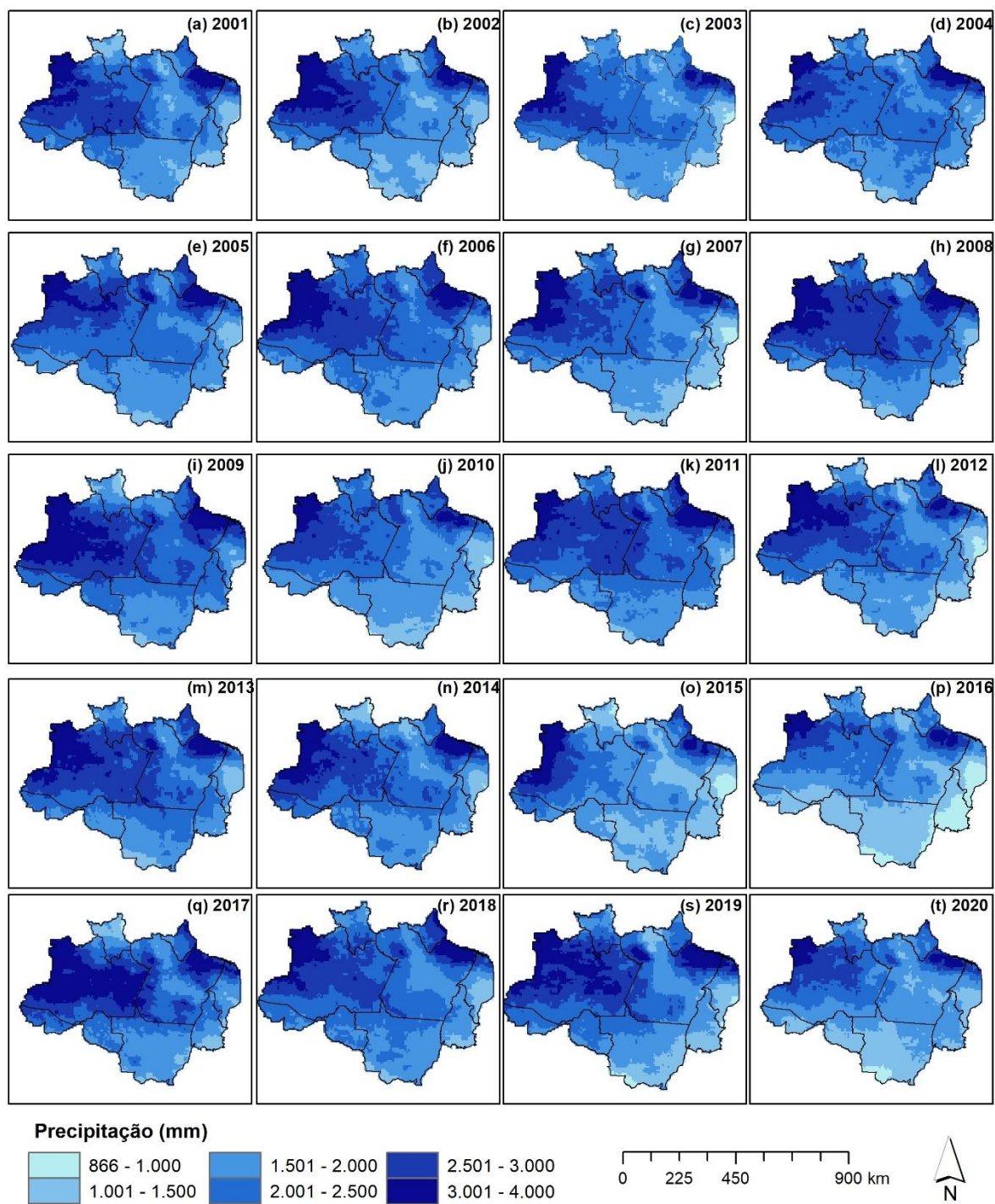


Figura 16. Precipitação média anual para a Amazônia Legal entre 2001 e 2020.

Tabela 11. Análises estatísticas da precipitação por estado da Amazônia Legal entre 2001 e 2020

Precipitação média (mm)																				
Estados	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Acre	2.153,6	2.038,2	2.021,1	2.148,7	1.831,1	2.008,3	2.020,8	2.059,8	2.320,8	1.819,9	2.094,7	2.196,4	2.192,1	2.389,3	2.162,0	1.378,6	2.404,7	2.074,7	2.198,6	1.569,2
Amapá	2.152,6	2.351,0	1.902,5	2.232,3	2.487,8	2.557,5	2.411,7	2.473,0	2.483,4	2.464,5	2.634,5	2.252,1	2.443,6	2.136,4	2.218,5	1.984,3	2.463,2	2.674,6	2.107,7	2.135,2
Amazonas	2.713,7	2.804,8	2.544,8	2.531,5	2.580,6	2.824,9	2.669,6	2.857,3	2.945,8	2.548,3	2.727,7	2.737,5	2.833,8	2.762,0	2.366,3	2.207,2	3.003,5	2.693,5	2.846,7	2.371,7
Maranhão	1.705,9	1.678,0	1.605,7	1.876,6	1.627,2	1.809,0	1.483,9	1.871,6	2.065,0	1.461,1	1.982,2	1.330,3	1.587,3	1.688,0	1.227,9	1.149,3	1.983,4	1.707,2	1.748,6	1.663,2
Mato Grosso	1.769,3	1.583,3	1.794,3	1.896,6	1.800,2	1.892,3	1.638,2	1.939,4	1.957,5	1.605,9	1.934,7	1.735,7	1.980,3	1.902,7	1.492,7	1.252,5	1.865,1	1.924,6	1.677,7	1.374,6
Pará	2.167,8	2.052,3	2.090,5	2.258,4	2.329,9	2.410,3	2.170,1	2.515,8	2.488,2	2.122,7	2.524,8	2.160,5	2.432,3	2.245,5	1.818,0	1.975,8	2.438,7	2.280,4	2.299,3	1.930,8
Rondônia	2.168,7	1.868,3	1.929,7	1.987,7	1.980,0	2.090,6	1.902,3	2.056,3	2.267,4	1.806,4	2.013,1	1.903,7	1.969,3	2.043,9	1.604,4	1.239,2	2.078,5	2.061,1	2.073,2	1.484,9
Roraima	1.643,3	1.981,2	1.891,2	2.032,2	2.222,9	2.259,7	2.273,0	2.358,2	1.719,7	2.226,9	2.355,0	1.976,8	2.115,0	1.626,4	1.398,8	2.055,5	1.625,1	2.139,5	2.181,5	2.069,1
Tocantins	1.670,3	1.620,8	1.585,2	1.849,5	1.788,8	1.827,8	1.359,4	1.873,1	2.112,5	1.504,5	1.990,0	1.522,9	1.902,7	1.777,8	1.336,3	934,6	1.773,7	1.701,7	1.467,3	1.567,0
Precipitação máxima (mm)																				
Estados	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Acre	2.725,4	2.600,5	1.643,3	2.620,5	2.248,7	2.430,2	2.339,9	2.511,3	2.815,0	2.185,3	2.474,3	2.586,1	2.633,4	2.832,2	2.677,5	1.812,2	2.839,7	2.356,2	2.775,4	1.947,8
Amapá	2.852,1	3.057,2	1.362,2	3.052,5	3.059,6	2.978,4	3.211,2	3.111,4	3.520,1	2.962,9	3.380,7	2.714,6	2.928,7	2.738,1	2.929,5	2.479,1	3.218,7	3.571,3	2.799,7	3.011,8
Amazonas	3.743,5	4.280,8	1.485,8	3.725,6	4.016,0	4.405,4	4.089,1	3.986,6	3.969,1	3.775,6	3.937,1	3.927,1	4.008,0	4.190,4	3.763,9	4.472,4	3.824,4	3.984,5	3.976,1	3.918,0
Maranhão	3.103,9	2.978,4	810,2	3.257,3	2.781,8	3.061,1	3.026,3	3.155,3	3.206,0	2.681,8	3.289,4	2.399,2	2.975,1	3.370,9	2.435,8	2.478,2	3.777,2	2.955,8	3.411,3	2.834,3
Mato Grosso	2.706,2	2.269,7	1.144,7	2.494,6	2.385,4	2.713,5	2.551,5	2.983,3	2.908,6	2.328,8	2.794,1	2.525,6	3.010,1	2.548,1	2.053,7	2.051,9	2.980,0	2.600,0	2.796,5	2.006,2
Pará	3.823,6	3.859,6	1.331,9	4.146,2	3.947,7	4.321,4	4.153,3	3.782,9	3.819,7	3.584,2	3.965,4	3.637,1	3.949,1	4.136,9	3.689,8	3.877,7	3.928,9	4.175,0	4.200,8	3.702,7
Rondônia	3.119,3	2.688,8	1.375,3	2.332,2	2.434,2	2.656,5	2.432,5	2.666,6	2.887,3	2.227,2	2.574,7	2.251,0	2.762,0	2.595,7	1.904,0	1.668,9	2.755,5	2.433,6	2.648,7	1.990,0
Roraima	2.589,0	2.613,5	1.295,0	2.673,9	3.229,4	2.792,8	2.867,8	3.056,7	2.809,5	2.764,8	3.113,7	3.179,8	2.916,4	2.636,9	2.076,0	2.814,2	2.910,8	2.699,3	3.150,8	2.870,9
Precipitação mínima (mm)																				
Estados	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Acre	1.869,7	1.602,3	2.461,5	1.688,8	1.473,0	1.727,5	1.627,8	1.710,8	2.003,6	1.598,3	1.673,0	1.916,0	1.741,8	1.914,8	1.719,4	993,2	1.845,7	1.843,6	1.849,0	1.276,7
Amapá	1.582,9	1.484,0	2.564,2	1.628,9	1.677,8	1.764,7	1.738,3	1.781,8	1.713,6	2.045,8	1.813,7	1.590,0	1.808,3	1.422,7	1.556,0	1.475,0	1.762,5	1.941,5	1.429,2	1.545,9
Amazonas	1.125,1	1.651,8	3.846,1	1.764,4	1.714,4	1.764,9	1.740,8	1.834,5	1.306,2	1.811,9	1.822,9	1.479,4	1.763,2	1.358,4	1.051,0	1.156,1	1.325,5	1.716,8	1.844,4	1.451,5
Maranhão	910,5	995,4	3.237,0	1.244,8	986,7	1.135,3	770,5	1.101,7	1.281,4	905,0	1.258,0	705,9	1.025,4	952,8	687,5	520,4	1.198,6	1.076,9	846,1	1.001,4
Mato Grosso	1.254,7	894,7	2.436,6	1.134,3	1.128,8	1.307,5	1.100,0	1.236,6	1.246,7	919,9	1.146,6	1.231,6	1.099,7	1.313,0	1.022,3	757,4	1.308,7	1.169,6	811,6	841,0
Pará	1.273,8	1.172,7	3.710,6	1.340,7	1.475,0	1.411,7	1.272,2	1.561,9	1.394,1	1.385,9	1.626,9	1.212,8	1.436,4	1.140,4	1.062,6	1.138,5	1.456,7	1.555,7	1.206,0	1.284,0
Rondônia	1.710,7	1.437,8	2.763,4	1.666,5	1.583,8	1.607,5	1.500,0	1.692,4	1.839,0	1.323,2	1.730,6	1.604,8	1.603,0	1.712,9	1.232,5	1.008,8	1.720,8	1.825,4	1.739,6	1.220,2
Roraima	904,3	1.100,6	2.306,8	1.395,9	1.378,2	1.538,3	1.386,5	1.442,1	886,4	1.778,9	1.551,9	1.152,6	1.299,2	683,0	750,7	1.126,2	843,5	1.353,0	1.281,8	1.291,6
Tocantins	1.123,9	1.050,7	2.103,5	1.294,8	1.209,9	1.240,8	744,7	1.240,5	1.296,5	1.101,9	1.408,1	947,0	1.238,1	1.028,2	820,1	517,3	1.104,5	1.231,1	847,2	1.194,5

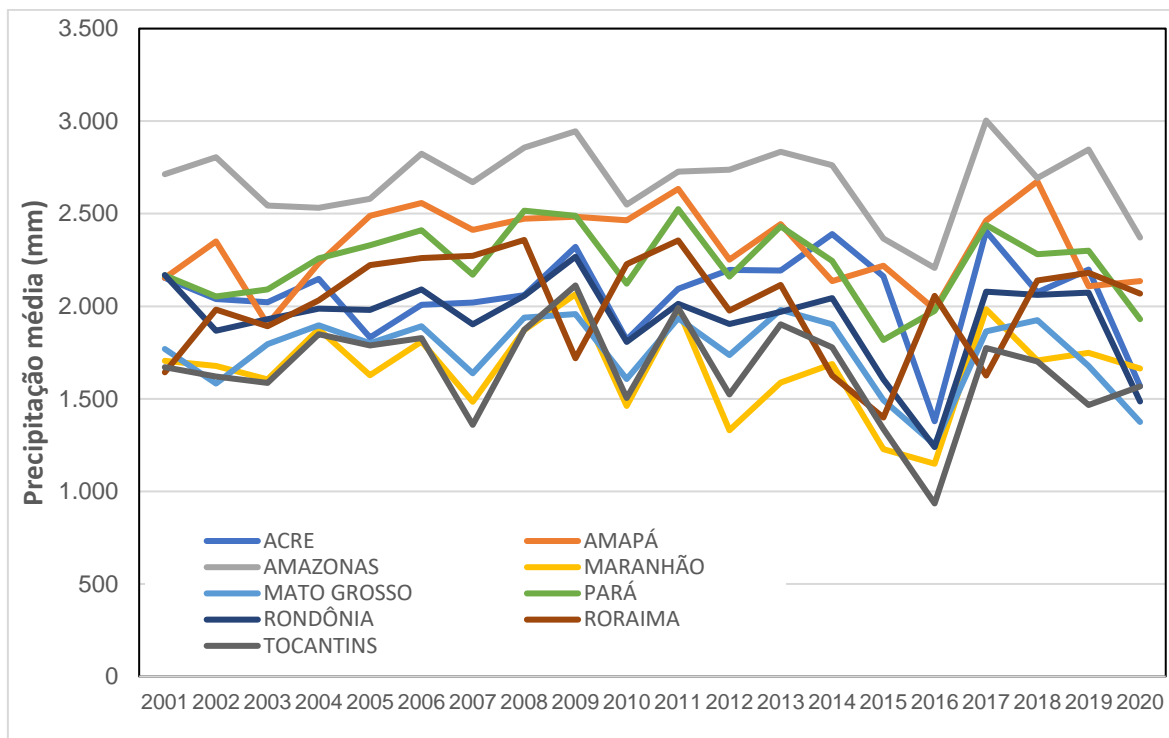


Figura 17. Distribuição temporal da precipitação média por estado entre 2001 e 2020.

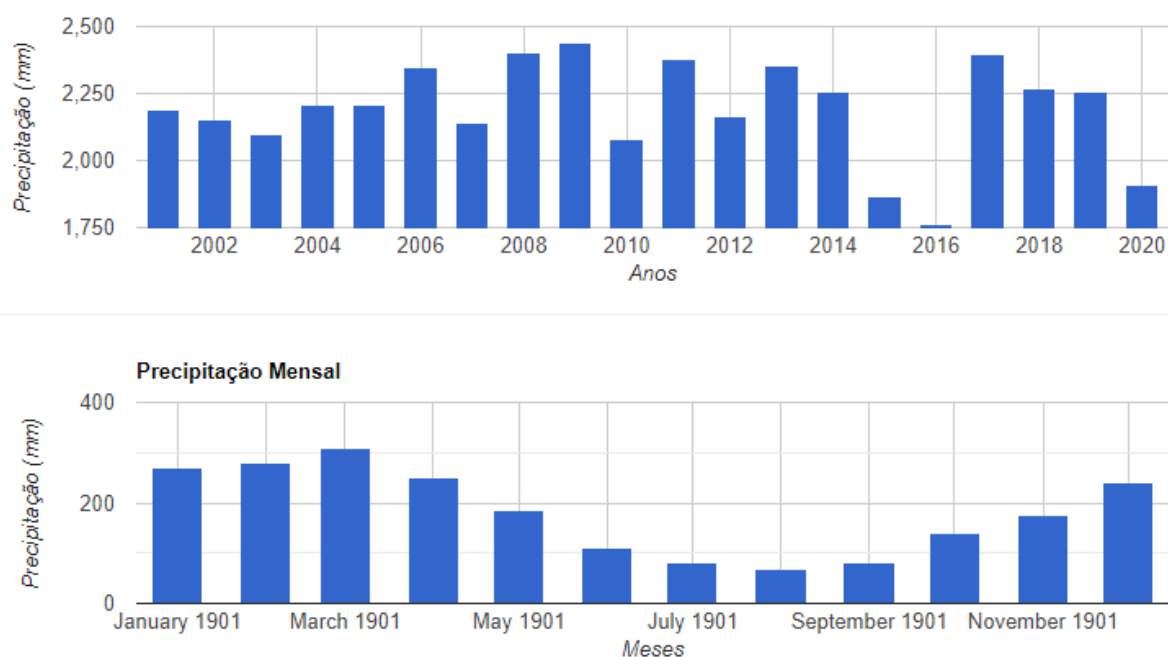


Figura 18. Precipitação média anual (a) e precipitação média mensal (b) na Amazônia Legal entre 2001 e 2020.

Como o clima da Terra é cíclico, existem ciclos muito longos, de séculos, provocados pela atividade solar, os ciclos médios, de décadas, provocados pela Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e os ciclos curtos, de meses, provocados pelo El Niño e o La Niña (HACKBART, 2009). Esses ciclos são alterados pelas modificações abruptas causadas pelo ser humano. De acordo com Oliveira (1999), o El Niño pode ser definido como sendo o aquecimento anormal das águas do Oceano Pacífico Equatorial, somado com o enfraquecimento dos ventos alísios na região equatorial. Essa conjuntura provoca um déficit de precipitação pluviométrica no norte e leste da Amazônia. As causas desse aquecimento ainda não são totalmente conhecidas e ambos os fenômenos não possuem nem duração, nem periodicidade exatas.

Os fenômenos El Niño e La Niña são fenômenos de larga escala que se originam no Oceano Pacífico e alteram o fluxo normal da célula de Walker. O El Niño se dá quando ocorre o aquecimento anômalo das águas superficiais do oceano Pacífico, gerando uma inversão nos padrões atmosféricos que se estende longitudinalmente por todo o globo terrestre. Assim, deve-se destacar que essas alterações no clima se devem sobretudo as mudanças das florestas e o aumento de CO₂ na atmosfera.

5.6 Identificação espacial das áreas com maior influência das queimadas e do desmatamento na precipitação e na temperatura da superfície

A Figura 19 apresenta a espacialização das áreas com maior variação entre precipitação e temperatura da superfície. Os resultados mostram que as áreas com maior significância (alta e média) estão localizadas em sua maior na porção conhecida como arco do desmatamento da Amazônia. Esses resultados corroboram e indicam que as áreas com maior variabilidade da precipitação e de temperatura da superfície são aquelas que indicam as áreas com maiores perdas de área florestal e queimadas na Amazônia Legal. Percebe-se ainda que a porção oeste da Amazônia Legal ainda consegue ter preservada sua vegetação nativa. Entretanto, este estudo chama a atenção dos poderes públicos para a necessidade de se ter políticas públicas voltadas para a preservação ambiental dessa região e tentar frear os avanços da agropecuária.

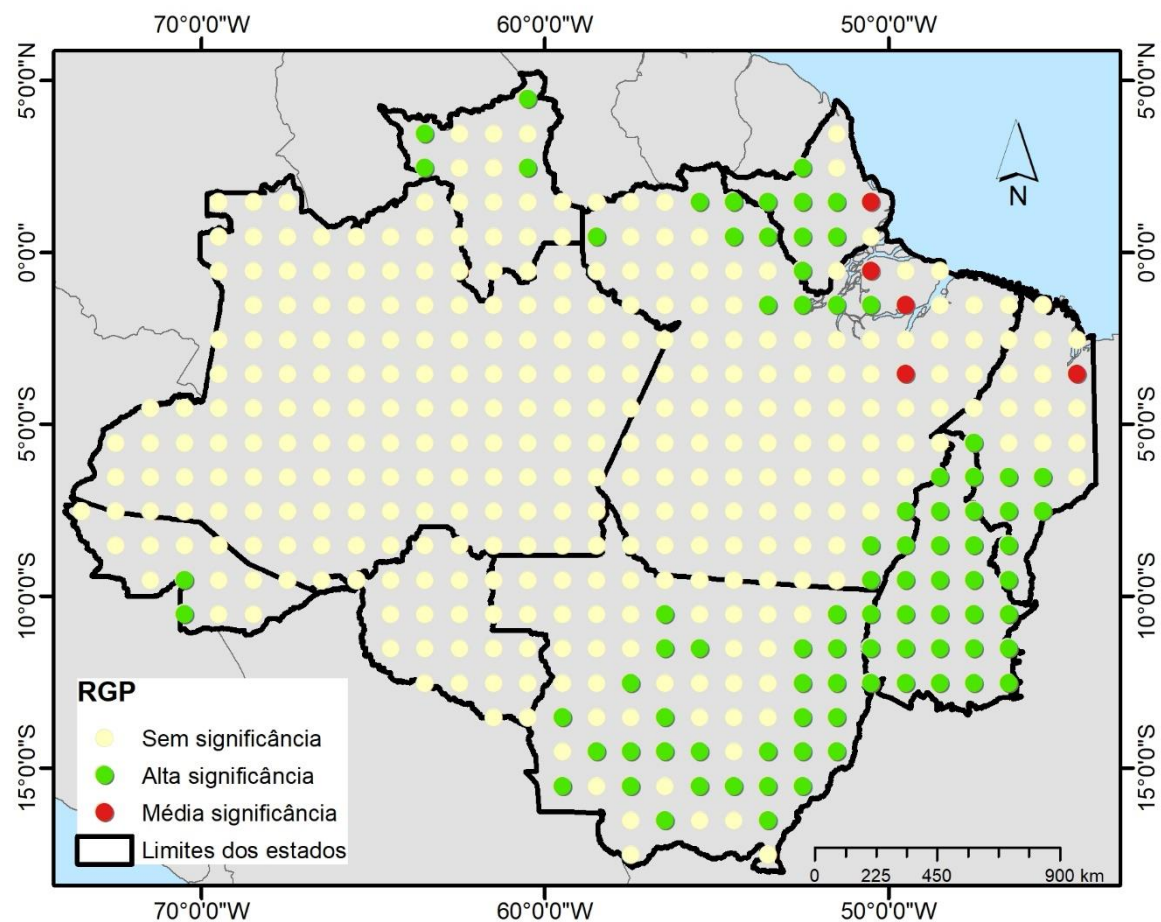


Figura 19. Identificação das áreas com maior variação entre precipitação e temperatura da superfície.

Diversos estudos, entre eles Di Leo et al. (2016) e Luo e Peng (2016), discutiram a relação entre temperatura da superfície e variáveis biofísicas. Alguns desses estudos, incluindo Zhou e Wang (2011) e Zhao et al. (2018) explorou tais relações usando modelos de regressão geograficamente ponderada (RGP). Muitos usaram um ou mais métodos em que as variáveis biofísicas são as variáveis independentes, para examinar sua relação com a temperatura da superfície. Fotheringham et al. (2015) afirmam que o RGP permite correlacionar as variáveis de resposta a um conjunto de variáveis independentes e é um método estatístico para modelagem espacial de processos heterogêneos (SILVA et al., 2021). É uma abordagem para modelagem heterogênea de processos espacialmente distribuídos e, devido a sua maior capacidade analítica e acurácia, fornece estimativas de alta precisão e eficiência. Um componente fundamental do RGP é o peso espacial pelo qual as relações espaciais são construídas. Normalmente os pesos espaciais são definidos por funções

nucleares espaciais, como a função Gaussiana (FOTHERINGHAM et al., 2015), em que os pesos estão relacionados às observações mais próximas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa analisou os impactos dos desmatamentos e as queimadas na Amazônia nas áreas de proteção indígenas e na variabilidade climática entre 2001 e 2020. Com base nos resultados obtidos, destacamos que no período analisado houve severas mudanças no uso e cobertura da terra na Amazônia para o período de 2001 a 2020. A espacialização dos desmatamentos e queimadas ocorridos em terras de proteção indígena na Amazônia para o período de 2001 a 2020 reforçam o alerta e a necessidade de proteção das agências de proteção ambiental do país contra essas ações criminosas que afetam a cultura e os povos indígenas. A detecção sistemática de queimadas no bioma Amazônia do Brasil é de fundamental importância para estimar as emissões regionais de carbono para a atmosfera.

Até agora, essas tentativas de mapeamento em grande escala, limitadas em número e de exatidão e precisão desconhecidas, foram baseadas no uso do produto de área queimada MODIS. Assim, este estudo teve como foco a primeira avaliação do desempenho desse produto de dados global sobre as distintas fisionomias e paisagens da Amazônia.

A análise da evolução espaço-temporal dos desmatamentos e queimadas na Amazônia para o período de 2001 a 2020 mostram um crescimento dessas práticas a partir de 2010. A análise da variabilidade espacial da precipitação ocorrida na Amazônia para o período de 2001 a 2020 apresentou uma diminuição no volume precipitado no período analisado.

Entre as várias limitações que os produtos globais de área queimada e desmatamentos apresentam, os longos ciclos de compósitos, como o período de aquisição de dados, sendo, portanto, uma das principais limitações dessa metodologia.

Por ora, é importante enfatizar o fato de que o produto MCD45A1, apesar de suas limitações espaciais, tem sido fundamental para o entendimento dos impactos do fogo nas paisagens da Amazônia, tanto no que diz respeito à distribuição de cicatrizes quanto ao comportamento do fogo no apoio a uma atuação territorial e ambiental mais efetiva. governança desse bioma ameaçado.

REFERÊNCIAS

- ABE, C. A.; LOBO, F. de L.; DIBIKE, Y. B.; COSTA, M. P. de F.; DOS SANTOS, V.; NOVO, E. M. L. M. Modelling the effects of historical and future land cover changes on the hydrology of an Amazonian basin. *Water*, v. 10, n. 7, 2018.
- AB'SABER, A. N. Bases para o estudo dos ecossistemas da Amazônia brasileira. *Rev. Estud. av. São Paulo*, v. 16, n. 45, p. 7-30, agosto de 2002. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142002000200002&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 18 de julho de 2019.
- ALENCAR, A.; ASNER, G. P.; KNAPP, D.; ZARIN, D. Temporal variability of forest fires in eastern Amazonia. *Ecological Applications*, v. 21, n. 7, p. 2397–2412, 2011.
- ALMEIDA, C. T. D.; DELGADO, R. C.; OLIVEIRA JUNIOR, J. F. D.; GOIS, G.; CAVALCANTI, A. S. Avaliação das estimativas de precipitação do produto 3B43-TRMM do estado do Amazonas. *Floresta e Ambiente*, 22(3), 279-286, 2015.
- ALMEIDA, J. R., SILVA, C. E., RODRIGUES, M. G. Avaliação dos impactos ambientais do desflorestamento sobre o regime hídrico da região metropolitana de Petrópolis (RJ). *Engineering Sciences*, v.1, n.1, p.6-13, 2013.
- ALVES, M.T.R., PIONTEKOWSKI, V.J., BUSCARDO, E., PEDLOWSKI, M.A., SANO, E.E., MATRICARDI, E.A.T. Effects of settlement designs on deforestation and fragmentation in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy*, v. 109, 105710, 2021.
- ANDERSON, L.O., DE ARAGÃO L.E.O.C., DE LIMA, A., SHIMABUKURO, Y.E. Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira. *Acta Amazonica*, v. 35, n. 4, 2005
- ANDERSON, L.O., MARCHEZINI, V. Mudanças na exposição da população à fumaça gerada por incêndios florestais na Amazônia: o que dizem os dados sobre desastres e qualidade do ar ?. *Saúde debate*, v. 44, Suplemento 2, 2020.
- ANDRÉASSIAN, V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, v. 291, n. 1–2, p. 1–27, 2004.
- ARAGÃO, L.E.O.C., MALHI, Y., ROMAN-CUESTA, R.M., SAATCHI, S., ANDERSON, L.O., SHIMABUKURO, Y.E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. *Geophysical Research Letters*, Medford, v. 34, p. 1-5, 2007.
- ARAÚJO, F. M., FERREIRA, L. G., ARANTES, A. A. Distribution patterns of burned areas in the Brazilian biomes: an analysis based on satellite data for the 2002–2010 period. *Remote Sensing*, v. 4, p. 1929-1946, 2012.
- ARRAUT, J.M., SATYAMURTY, P. Precipitation and water vapor transport in the Southern Hemisphere with emphasis on the South American region. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 48, n. 9, p. 1902-1912, 2009.

ARTAXO, P. Working together for Amazonia, American Association for the Advancement of Science, 2019.

ASHOURI, H., HSU, K.L., SOROOSHIAN, S., BRAITHWAITE, D.K., KNAPP, K.R., CECIL, L.D., NELSON, B.R., PRAT, O.P. PERSIANN-CDR: daily precipitation climate data record from multi-satellite observations for hydrological and climate studies. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 96, n. 1, p. 197-210, 2015.

BARREDA-BAUTISTA, B.D.L., LÓPEZ-CALOCA, A.A., COUTURIER, S., SILVÁN-CÁRDENAS, J.L. Tropical dry forests in the global picture: the challenge of remote sensing-based change detection in tropical dry environments. CARAYANNIS, E.G. (Ed.). Planet earth 2011 – Global warming challenges and opportunities for policy and practice, InTech, p. 231-256, 2011.

BEDIA, J., HERRERA, S., GUTIÉRREZ, J.M., BENALI, A., BRANDS, S., MOTA, B., MORENO, J.M. Global patterns in the sensitivity of burned area to fire-weather: Implications for climate change. Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdam, v. 214-215, p. 369-379, 2015.

BEUCHLE, R., GRECCHI, R.C., SHIMABUKURO, Y.E., SELIGER, R., EVA, H.D., SANO, E., ACHARD, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. Applied Geography, v. 58, p. 116-127, 2015.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Verificação da eficiência e eficácia de um algoritmo evolucionário multi-objetivo na calibração automática do modelo hidrológico IPH II. RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 14, n. 3, p. 37-50, 2009.

BRITO, C.S., SILVA, R.M., SANTOS, C.A.G., BRASIL NETO, R.M., COELHO, V.H.R. Monitoring meteorological drought in a semiarid region using two long-term satellite-estimated rainfall datasets: A case study of the Piranhas River basin, northeastern Brazil. Atmospheric Research, v. 250, 105380, 2021.

CAKIR, H.I., KHORRAM, S., NELSON, S.A.C. Correspondence analysis for detecting land cover change. Remote Sensing of Environment, v. 102, p. 306-317, 2006.

CARUSO, C., QUARTA, F. Interpolation methods comparison. Computers & Mathematics with Applications, v. 35, n. 2, p. 109-126, 1998.

CARVALHO, W. D.; MUSTIN, K.; HILÁRIO, R. R.; VASCONCELOS, I. M.; EILERS, V.; FEARNside, P. M. Deforestation control in the Brazilian Amazon: A conservation struggle being lost as agreements and regulations are subverted and bypassed. Perspectives in Ecology and Conservation, v. 17, n. 3, p. 122-130. 2019.

CHAPPELL, A.; RENZULLO, L. J.; RAUPACH, T. H.; HAYLOCK, M. Evaluating geostatistical methods of blending satellite and gauge data to estimate near real-time daily rainfall for Australia. Journal of hydrology, 493, 105-114, 2013.

CHUVIECO, E., MOUILLOT, F., VAN DER WERF, G.R., SAN MIGUEL, J., TANASSE, M., KOUTSIAS, N., GARCÍA, M., YEBRA, M., PADILLA, M., GITAS, I., HEIL, A.

Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. *Remote Sensing of Environment*, v. 225, p. 45-64, 2019.

CLIMATE DATA ORG. Dados Climáticos para Cidades Mundiais. 2019. Disponível em <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/>> Acesso em 18 de julho de 2019.

COHEN, J. C. P.; BELTRÃO, J. C.; GANDU, A. W.; SILVA, R. R. Influência do desmatamento sobre o ciclo hidrológico na Amazônia. *Rev. Cienc. Cult.*, São Paulo, v. 59, n. 3, p. 36-39, 2007.

CORDEIRO, A.L.M. mudanças climáticas e perda de solo no Arco do Desflorestamento da Amazônia. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará, 2021.

CORTÉS-RAMOS, J., FARFÁN, L.M., HERRERA-CERVANTES, H. Assessment of tropical cyclone damage on dry forests using multispectral remote sensing: The case of Baja California Sur, Mexico. *Journal of Arid Environments*, v. 178, 104171, 2020

COSTA, E.P., FIEDLER, N.C., MEDEIROS, M.B., WANDERLEY, F.B. Incêndios florestais no entorno de unidades de conservação - estudo de caso na Estação Ecológica de Águas emendadas, Distrito Federal. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 195-206, 2009.

CUNHA, E. R., SANTOS, C. A. G., SILVA, R. M., BACANI, V. M., TEODORO, P. E., PANACHUKI, E., OLIVEIRA, N. S. Mapping LULC types in the Cerrado-Atlantic Forest ecotone region using a Landsat time series and object-based image approach: A case study of the Prata River Basin, Mato Grosso do Sul, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 192, p. 547-567, 2020.

CUNHA, E.R., SANTOS, C.A.G., SILVA, R.M., BACANI, V.M., POTT, A. Future scenarios based on a CA-Markov land use and land cover simulation model for a tropical humid basin in the Cerrado/Atlantic Forest ecotone of Brazil. *Land Use Policy*, v. 101, p. 105141, 2021.

DA SILVA, S.S., OLIVEIRA, I., MORELLO, T.F., ANDERSON, L.O., KARLOKOSKI, A., BRANDO, P.M., DE MELO, A.W.F., DA COSTA, J.G., DE SOUZA, F.S.C., DA SILVA, I.S., NASCIMENTO, E.S., PEREIRA, M.P., DE ALMEIDA, M.R.N., ALENCAR, A., DE ARAGÃO, L.E.O.C., BROWN, I.F., GRAÇA, P.M.L.A., FEARNSSIDE, P.M. Burning in southwestern Brazilian Amazonia, 2016–2019, *Journal of Environmental Management*, v. 286, 112189, 2021.

DANTAS, J.C., SILVA, R.M., SANTOS, C.A.G. Drought impacts, social organization and public policies in northeastern Brazil: A case study of the Upper Paraíba River basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 192, p. 317, 2020.

DE ARAÚJO, F.M., FERREIRA, L.G. Satellite-based automated burned area detection: a performance assessment of the MODIS MCD45A1 in the Brazilian savanna. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 36, p. 94-102, 2015.

DE JESUS, J.B., DA ROSA, C.N., BARRETO, D.C., FERNANDES, M.M. Análise da incidência temporal, espacial e de tendência de fogo nos biomas e unidades de conservação do Brasil. *Ciência Florestal*, v. 30, n. 1, 2020.

DILEO, N.; ESCOBEDO, F.J.; DUBBELING, M. The role of urban green infrastructure in mitigating land surface temperature in Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. *Environment, Development and Sustainability*, v. 18, n 2, p. 373-392, 2016.

DINIZ C.G., SOUZA, A.A.A., SANTOS, D.C., DIAS, M.C., DA LUZ, N.C., DE MORAES, D.R.V., MAIA, J.S., GOMES, A.R., NARVAES, I.S., VALERIANO, D.M., MAURANO, L.E.P., ADAMI, M. DETER-B: The New Amazon Near Real-Time Deforestation Detection System. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 8, n. 7, p. 3619-3628, 2015.

ESPINOZA, J. C.; MARENGO, J. A.; RONCHAIL, J.; CARPIO, J. M.; FLORES, L. N.; GUYOT, J. L. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. *Environmental Research Letters*, 9(12), 124007, 2014.

FARINOSI, F.; ARIAS, M. E.; LEE, E.; LONGO, M.; PEREIRA, F. F.; LIVINO, A.; MOORCROFT, P. R.; BRISCOE, J. Future Climate and Land Use Change Impacts on River Flows in the Tapajós Basin in the Brazilian Amazon. *Earth's Future*, v. 7, n. 8, p. 993–1017, 2019.

FEARNSIDE, P. M. Consequências do desmatamento da Amazônia. *Scientific American Brasil Especial Biodiversidade*, v. 3, p. 54 – 59, 2010. Disponível em: <http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/Preprints/2010/Desmatamento-Scientific%20American%20Brasil-Preprint.pdf> Acesso em 12 de julho de 2019.

FEARNSIDE, P. M. Deforestation of the Brazilian Amazon. In: *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. [s.l.] : Oxford University Press, 2017.

FEARNSIDE, P.M. Deforestation of the Brazilian Amazon. In: *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. Oxford University Press, 2017.

FERRANTE, L.; FEARNSIDE, P. M. Brazil's new president and 'ruralists' threaten Amazonia's environment, traditional peoples and the global climate. *Environ. Conserv.* v. 46 n. 4, p. 261 – 263, 2019.

FERRARI, A.L., VECCHIA, F.A.S., COLABONE, R.O. Tendência e variabilidade anuais da temperatura e da pluviosidade em Pirassununga – SP. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 10, n. 1, p. 30-46, 2012.

FERREIRA DA SILVA, G.J., DE OLIVEIRA, N.M., SANTOS, C.A.G., DA SILVA, R.M. Spatiotemporal variability of vegetation due to drought dynamics (2012-2017): a case study of the Upper Paraíba River basin, Brazil. *Natural Hazards*, v. 102, p. 939-964, 2020.

FOLEY, I.A., BOTTA, A., COE, M.T., COSTA, M.H. The El Niño-Southern Oscillation and the climate ecosystem and river of Amazônia. *G. Biogeochemical Cycles*, v.16, p. 1132-1144. 2002.

FOTHERINGHAM, A.S.; CRESPO, R.; YAO, J. Geographical and Temporal Weighted Regression (GTWR). *Geographical Analysis*, v. 47, p. 431-452, 2015.

FROHN, R. C.; HAO, Y. Landscape metric performance in analyzing two decades of deforestation in the Amazon Basin of Rondonia, Brazil. *Remote Sensing of Environment*, 2006. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425705003573>> Acesso em 18 de julho de 2019.

FUNAI – Fundação Nacional do Índio. Terras Indígenas. 2019. Disponível em <<http://www.funai.gov.br/index.php/indios-no-brasil/terras-indigenas>> Acesso em 20 de julho de 2019.

FUNK, C., PETERSON, P., LANDSFELD, M., PEDREROS, D., VERDIN, J., SHUKLA, S., HUSAK, G., ROWLAND, J., HARRISON, L., HOELL, A., MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes. *Science Data*, 2, 2015.

GALVÃO, A. C. F.; LOURENÇO, A.; MOUTINHO, P.; STELLA, O.; LIMA, A.; CHRISTOVAM, M.; ALENCAR, A.; CASTRO, I.; NEPSTAD, D. REDD no Brasil: um enfoque amazônico: fundamentos, critérios e estruturas institucionais para um regime nacional de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal – REDD. – 3ª Edição – Brasília, DF : Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2011.

G1. Queimadas e desmatamento estão relacionados na Amazônia. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/natureza/noticia/2019/08/23/queimadas-e-desmatamento-estao-relacionados-na-amazonia-entenda.ghhtml>. Acessado em: 23/08/2021.

GEORGANOS, S., ABDI, A.M., TENENBAUM, D.E., KALOGIROU, S. Examining the NDVI-rainfall relationship in the semi-arid Sahel using geographically weighted regression. *Journal of Arid Environments*, v.146, p. 64-74, 2017.

GORELICK, N., HANCHER, M., DIXON, M., ILYUSHCHENKO, S., THAU, D., MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.* 202, 18–27, 2017.

GOTO, K., GOTO, T., NMOR, J.C., MINEMATSU, K., GOTO, K. Evaluating salinity damage to crops through satellite data analysis: application to typhoon affected areas of southern Japan. *Natural Hazards*, v. 75, p. 2815-2828, 2015.

GOWARD, S.N., CHANDER, G., PAGNUTTI, M., MARX, A., RYAN, R., THOMAS, N., TETRAULT, R. Complementarity of ResourceSat-1 AWiFS and Landsat TM/ETM+ sensors. *Remote Sensing of Environment*, v. 123, p. 41-56, 2012.

GREENPEACE. Lei do Desmatamento Zero. 2021. Disponível em: <https://www.greenpeace.org.br/todos-pela-amazonia>. Acessado em: 20/07/2021.

HACKBART Eugenio. Oscilação Decadal do Pacífico - Cientistas reconstroem o clima do planeta. Disponível em: <http://www.metsul.com/secoes/visualiza.php?>. Acesso em 20 set. 2021.

HANSEN, M.C., P.V, P., MOORE, R., HANCHER, M., TURUBANOVA, S., TYUKAVINA, A., THAU, D., STEHMAN, S. V., GOETZ, S.J., LOVELAND, T.R., KOMMAREDDY, A., EGOROV, A., CHINI, L., JUSTICE, C.O., TOWNSHEND, J.R. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, v. 342, n. 6160, p. 850-853, 2013.

HOEKSTRA, J.M., BOUCHER, T.M., RICKETTS, T.H., ROBERTS, C. Confronting a biome crisis: global disparities of habitat loss and protection. *Ecology Letters*, 8 (2004), pp. 23-29

HSU, K.-L., GAO, X., SOROOSHIAN, S., GUPTA, H.V. Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 36, n. 9, p. 1176-1190, 1997.

HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E., GAO, X., FERREIRA, L. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v. 12, n. 12, p. 195-213, 2002.

HUETE, A.; JUSTICE, C.; LIU, H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment*, 59: 224– 234, 1994.

HUETE, A.; LIU, H.Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59: 440-451, 1997.

HUETE, A.R.; JUSTICE, C.; VAN LEEUWEN, W. MODIS vegetation index (MOD13) algorithm theoretical basis document. [online]. 3: 1-142. <modis-land.gsfc.nasa.gov/pdfs/atbd_mod13.pdf>. Visitado em (7 novembro 2002), 1999.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo 2010. 2010. Disponível em <<https://censo2010.ibge.gov.br/>> Acesso em 20 de julho de 2019.

IBGE – Mapa de Biomas (2004). Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm.

INPE. Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por satélites: sistemas PRODES, DETER, DEGRAD e queimadas. São Paulo, Brasil: INPE, 2008.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, 1435 p., 2014.

ISA – INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL. Terras indígenas da Amazônia Brasileira. 2021.

KALAMANDEEN, M.; GLOOR, E.; MITCHARD, E.; QUINCEY, D.; ZIV, G.; SPRACKLEN, D.; SPRACKLEN, B.; ADAMI, M.; ARAGAÕ, L. E. O. C.; GALBRAITH, D. Pervasive Rise of Small-scale Deforestation in Amazonia. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, 2018.

KANG, H.; SRIDHAR, V. Combined statistical and spatially distributed hydrological model for evaluating future drought indices in Virginia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 12, p. 253–272, 2017.

KENDALL, M.G. Rank correlation methods. 1. ed. Griffin, London, 1975.

KIDD, C. Satellite rainfall climatology: A review. *International Journal of Climatology A Journal of the Royal Meteorological Society*, 21(9), 1041-1066, 2001.

KIDD, C.; HUFFMAN, G. Global precipitation measurement. *Meteorological Applications*, 18(3), 334-353, 2011.

KONDA, V.G.R.K., CHEJARLA, V.R., MANDLA, V.R., VOLETI, V., CHOKKAVARAPU, N. Vegetation damage assessment due to Hudhud cyclone based on NDVI using Landsat-8 satellite imagery. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 11, n. 35, 2018.

LATRUBESSE, E.M., ARIMA, E.Y., DUNNE, T., PARK, E., BAKER, V.R., D'HORTA, F.M., WIGHT, C., WITTMANN, F., ZUANON, J., BAKER, P.A., RIBAS, C.C., NORGAARD, R.B., FILIZOLA, N., ANSAR, A., FLYVBJERG, B. and STEVAUX, J.C., 2017. Damming the rivers of the Amazon basin. *Nature*, vol. 546, no. 7658, pp. 363-369.

LEVIZZANI, V. Intense rainfall monitoring from geostationary satellites. In *Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*, 9 th, Paris, France (pp. 327-330), 1999.

LI, L., FRIEDL, M.A., XIN, Q., GRAY, J., PAN, Y., FROLKING, S. Mapping crop cycles in China using MODIS-EVI time series. *Remote Sensing*, v. 6, n. 3, p. 2473-2493, 2014.

LOUZADA, V.M., RIBEIRO, C.B.M. Impacts of land-use change on southeast Amazonia basin streamflow. *Revista Ambiente e Água*, v.14, n. 2, 2019.

LUO, X.; PENG, Y. Scale effects of the relationships between urban heat Islands and impact factors based on a geographically weighted regression model. *Remote Sensing*, v. 8, n. 9, p. 760, 2016.

LUZ, C.C.S., RAMOS, A.W.P., DE BARROS, C.A., NEVES, S.M.A.S., DA SILVA, J.S.V., GALVANIN, E.A.S. NDVI e EVI aplicados à análise da dinâmica temporal da cobertura vegetal e usos da terra da bacia do córrego Padre Inácio-Mato Grosso, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 44, 2021.

MAIDMENT, R. I.; GRIMES, D. I.; ALLAN, R. P.; GREATREX, H.; ROJAS, O.; LEO, O. Evaluation of satellite-based and model re-analysis rainfall estimates for Uganda. *Meteorological Applications*, 20(3), 308-317, 2013.

MALHI, Y. J.; ROBERTS, T.; BETTS, R. A.; KILLEEN, T. J.; LI, W.; NOBRE, C. A. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science*, v.319, n.4, p.169-172, 2008.

MALHI, Y.J., ROBERTS, T., BETTS, R.A., KILLEEN, T. J., LI, W., NOBRE, C.A. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science*, v.319, n.4, p.169-172, 2008.

MANN, H.B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, v. 13, n. 4, p. 245-259, 1945.

MARÇAL, N.A., SILVA, R.M., SANTOS, C.A.G., SANTOS, J.S. Analysis of the environmental thermal comfort conditions in public squares in the semiarid region of northeastern Brazil. *Building and Environment*, v. 152, p. 145-159, 2019.

MARCOS, B., GONÇALVES, J., ALCARAZ-SEGURA, D., CUNHA, M., HONRADO, J.P. Improving the detection of wildfire disturbances in space and time based on indicators extracted from MODIS data: a case study in northern Portugal. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 78, p. 77-85, 2019.

MARENGO, J. A. O futuro clima do Brasil. *Revista USP*, n. 103, p. 25-32, 22 nov. 2014.

MEKONNEN, K., MELESSE, A.M., WOLDESENBET, T.A. Effect of temporal sampling mismatches between satellite rainfall estimates and rain gauge observations on modelling extreme rainfall in the Upper Awash Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 598, 126467, 2021.

MISHRA, Y.; NAKAMURA, T.; BABEL, M. S.; NINSAWAT, S.; OCHI, S. Impact of Climate Change on Water Resources of the Bheri River Basin, Nepal. *Water*, v. 10, n. 2, p. 220, 2018.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Mapas de Cobertura Vegetal dos Biomas Brasileiros. 2014. Disponível em: <http://mapas.mma.gov.br/mapas/aplic/probio/datadownload.htm?>.

MOREIRA, A. A.; RUHOFF, A. L.; ROBERTI, D. R.; SOUZA, V. de A.; DA ROCHA, H. R.; DE PAIVA, R. C. D. Assessment of terrestrial water balance using remote sensing data in South America. *Journal of Hydrology*, v. 575, p. 131–147, 2019.

MÜLLER, C. R., Brazil and the Amazon Rainforest – Deforestation, Biodiversity and Cooperation with the EU and International Forums, In-depth analysis for the committee on the Environment, Public Health and Food Safety of the European Parliament, Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies, **European Parliament**, Luxembourg, 2020.

NASCIMENTO, C. P. Porto Velho: O Processo de Ocupação e Urbanização de Rondônia: Uma Análise das Transformações Sociais e Espaciais. *Revista de Geografia*. Recife: UFPE – CG/NAPA, v. 27, n. 2, mai/ago, 2010. Disponível em <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/228806/23218>> Acesso em 18 de julho de 2021

NASCIMENTO, C. P.; SANTOS, C.; SILVA. Porto Velho: A Produção do Espaço Urbano de Rondônia (1980/2010). *Revista Geografar*. v. 7, n. 1, p. 20-52, Curitiba, 2012. Disponível em <<https://revistas.ufpr.br/geografar/article/view/22447/18461>> Acesso em 18 de julho de 2019.

O'CONNOR, J.; SANTOS, M. J.; REBEL, K. T.; DEKKER, S. C. The influence of water table depth on evapotranspiration in the Amazon arc of deforestation. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 23, n. 9, p. 3917–3931, 2019.

OLIVEIRA, José Aldemir de et al. (organizadores). Cidade de Manaus: visões interdisciplinares. Manaus: Edua, 2003.

OLIVEIRA, O. A. Geografia de Rondônia: Espaço e Produção. Porto Velho-RO, Dinâmica Editora e Distribuidora LTDA. 2003

OVIEDO, A.; LIMA, W. P.; AUGUSTO, C. O arco do desmatamento e suas flechas. 2020.

PANDAY, P. K.; COE, M. T.; MACEDO, M. N.; LEFEBVRE, P.; CASTANHO, A. D. d. A. Deforestation offsets water balance changes due to climate variability in the Xingu River in eastern Amazonia. *Journal of Hydrology*, v. 523, p. 822–829, 2015.

PEIXE BR - Associação Brasileira da Piscicultura. Anuário PeixeBR da Piscicultura 2018. p. 71, São Paulo/SP, 2018. Disponível em <<https://www.peixebr.com.br/anuario2018/>> Acesso em 20 de julho de 2019.

PENNINGTON, R.T., LEWIS, G.P., RATTER, J.A. An overview of the plant diversity, biogeography and conservation of neotropical savannas and seasonally dry forests. Pennington, R.T., Lewis, G.P., Ratter, J.A. (Eds.). *Neotropical savannas and seasonally dry forests: Diversity, biogeography, and conservation*, CRC Press, Florida (2006), pp. 1-29

PEREIRA FILHO, A. J.; CARBONE, R. E.; TUTTLE, J. D.; KARAM, H. A. Convective rainfall in Amazonia and adjacent tropics. *Atmospheric and Climate Sciences*, 5(02), 137, 2015.

PEREIRA FILHO, A. J.; VEMADO, F.; VEMADO, G.; GOMES VIEIRA REIS, F. A.; GIORDANO, L. D. C.; CERRI, R. I.; ZAINÉ, J. E. A Step towards Integrating CMORPH Precipitation Estimation with Rain Gauge Measurements. *Advances in Meteorology*, 2018.

PÉREZ, R.; CEBECAUER, T.; ŠÚRI, M. Semi-empirical satellite models. *Solar energy forecasting and resource assessment*, 21-48, 2013.

PORTILLO-QUINTERO, C.A., SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G.A. Extent and conservation of tropical dry forests in the Americas. *Biological Conservation*, v. 143, p. 144-155, 2010.

PRODES – PROGRAMA DE MONITORAMENTO DO DESMATAMENTO DA FLORESTA AMAZONICA BRASILEIRA POR SATÉLITE - PRODES, 2019. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodesmunicipal.php>> Acesso em 30 de out. de 2019.

REIS, M., GRAÇA, P.M.L.A., YANAI, A.M., RAMOS, C.J.P., FEARNSSIDE, P.M. Forest fires and deforestation in the central Amazon: Effects of landscape and climate on spatial and temporal dynamics. *Journal of Environmental Management*, v. 288, 112310, 2021.

RIVERO, S.; ALMEIDA, O.; ÁVILA, S.; OLIVEIRA, W. Pecuária e desmatamento: uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. *Nova economia*, 19, 41-66, 2009.

ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A., DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third Symposium of ERTS, Greenbelt, Maryland, USA. NASA SP-351, V1:309-317, 1973.*

ROY, D.P., BOSCHETTI, L., JUSTICE, C.O., JU, J. The collection 5 MODIS burned area product-global evaluation by comparison with the MODIS active fire product. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, n. 9, p. 3690-3707, 2008.

RUFINO, M. P. Para além do espaço intocado. In: FANY, R. (Org.). *Terras Indígenas e Unidades de Conservação da natureza: o desafio das sobreposições*. São Paulo: Instituto Socioambiental, 2004

RUIZ, J., LÁZARO, J., CANO, I., LEAL, P. Burned area mapping in the north American boreal Forest using Terra-MODIS LTDR (2001–2011): a comparison with the MCD45A1, MCD64A1 and BA GEOLAND-2 products. *Remote Sensing*, v. 6, n. 1, p. 815-840, 2014.

SANTOS, A. M. Cartografias das terras e dos povos indígenas em Rondônia. 314 f. Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, 2014.

SANTOS, A. M.; GOMIDE, M. L. C. A Ocupação no Entorno das terras Indígenas em Rondônia, Brasil. v. 35, n.3, p. 417-436, *Rev. Bol. Goia. Geogr.* 2015. Disponível em <<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5280102.pdf>> Acesso em 20 de julho de 2019.

SANTOS, C.A.G., BRASIL NETO, R.M., NASCIMENTO, T.V.M., SILVA, R.M., MISHRA, M., FRADE, T.G. Geospatial drought severity analysis based on PERSIANN-CDR-estimated rainfall data for Odisha state in India (1983-2018). *Science of The Total Environment*, v. 750, 141258, 2021.

SANTOS, C.A.G., NASCIMENTO, T.V.M., SILVA, R.M. Analysis of forest cover changes and trends in the Brazilian semiarid region between 2000 and 2018. *Environmental Earth Sciences*, v. 79, 418-438, 2020.

SANTOS, J. Y. G. Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na bacia do rio Tapacurá (Pernambuco – Brasil). p. 205. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – p. 205. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SANTOS, J.C., LEAL, I.R., CORTEZ, J.S.A., FERNANDES, G.W., TABARELLI, M. Caatinga: the scientific negligence experienced by a dry tropical forest. *Tropical Conservation Science*, v. 4, p. 276-286, 2011.

SANTOS, J.Y.G., MONTENEGRO, S.M.G.L., SILVA, R.M., SANTOS, C.A.G., QUINN, N.W., XAVIER, A.P.C., RIBEIRO NETO, A. Modeling the impacts of future LULC and climate change on runoff and sediment yield in a strategic basin in the Caatinga/Atlantic forest ecotone of Brazil. *Catena*, v. 202, p. 558-578, 2021.

SCHIELEIN, J.; BÖRNER, J. Recent transformations of land-use and land-cover dynamics across different deforestation frontiers in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy*, v. 76, p. 81–94, 2018.

SEMPER-PASCUAL, A., DECARRE, J., BAUMANN, M., BUSO, J.M., CAMINO, M., GOMEZ-VALENCIA, B., KUEMMERLE, T. Biodiversity loss in deforestation frontiers: linking occupancy modelling and physiological stress indicators to understand local extinctions. *Biology and Conservation*, v. 236, p. 281–288, 2019.

SEMPER-PASCUAL, A.; DECARRE, J.; BAUMANN, M.; BUSO, J.M.; CAMINO, M.; GOMEZ-VALENCIA, B.; KUEMMERLE, T. Biodiversity loss in deforestation frontiers: linking occupancy modelling and physiological stress indicators to understand local extinctions. *Biology and Conservation*, v. 236, p. 281–288, 2019.

SEN, P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, v. 63, p. 1379-1389, 1968.

SHRESTHA, S.; BHATTA, B.; SHRESTHA, M.; SHRESTHA, P. K. Integrated assessment of the climate and land use change impact on hydrology and water quality in the Songkhram River Basin, Thailand. *Science of the Total Environment*, v. 643, p. 1610–1622, 2018.

SILVA, D. S.; BLANCO, C. J. C.; DOS SANTOS JUNIOR, C. S.; MARTINS, W. L. D. Modeling of the spatial and temporal dynamics of erosivity in the Amazon. *Modeling Earth Systems and Environment*. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(1), 513-523, 2019.

SILVA, G.J.F., MACEDO, M.L.A., SILVA, R.M. Caracterização espaço-temporal das tipologias vegetais em ambiente de caatinga degradada: quantificação por meio de variáveis biofísicas. *Ateliê Geográfico*, v. 13, p. 92-110, 2019.

SILVA, J. S., DA SILVA, R. M., SILVA, A. M. Mudanças do uso e ocupação do solo e degradação eco-ambiental usando imagens orbitais: o estudo de caso da Bacia do Rio Bacanga, São Luís (MA). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 9, n. 1, p. 265-279, 2016.

SILVA, J.F.C.B.C., SILVA, R. M., SANTOS, C.A.G., SILVA, A.M., VIANNA, P.C.G. Analysis of the response of the Epitácio Pessoa reservoir (Brazilian semiarid region) to potential future drought, water transfer and LULC scenarios. *Natural Hazards*, v. 107, p. 458-478, 2021.

SILVANO, R.A.M., DO AMARAL, B.D. and OYAKAWA, O.T., 2000. Spatial and temporal patterns of diversity and distribution of the Upper Juruá River fish community (Brazilian Amazon). *Environmental Biology of Fishes*, vol. 57, no. 1, pp. 25-35.

SILVEIRA, L.G.T., CORREIA, F.W.S., CHOU, S.C., LYRA, A., GOMES, W.B., VERGASTA, L., SILVA, P.R.T. KPRreciclagem de Precipitação e Desflorestamento na Amazônia: Um Estudo de Modelagem Numérica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.32, n. 3, 2017.

SOO, E. Z. X.; JAAFAR, W. Z. W.; LAI, S. H.; ISLAM, T.; SRIVASTAVA, P. Evaluation of satellite precipitation products for extreme flood events: case study in Peninsular Malaysia. *Journal of Water and Climate Change*, 10(4), 871-892, 2019.

SOUZA, L.S.B., MOURA, M.S.B., SEDIYAMA, G.C., SILVA, T.G.F. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. *Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 50, n. 8, p. 627-636, 2015.

STICKLER, C. M.; COE, B. M. T.; COSTAC, M. H.; NEPSTADA, D. C.; MCGRATH, D. G.; DIAS, L. C. P.; RODRIGUES, H. O.; SOARES FILHO, B. S. Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v.110, n.23, p.9601-9606, 2013

SULLA-MENASHE, D., FRIEDL, M.A. User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover (MCD12Q1 and MCD12C1) Product. USGS, Figure 1, 1–18. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1>.

TASKER, K.A., ARIMA, E.Y. Fire regimes in Amazonia: The relative roles of policy and precipitation. *Anthropocene*, v. 14, p. 46-57, 2016.

TEIXEIRA, M.A.D.; FONSECA, D.R. História Regional (Rondônia). Porto Velho,

TESTA, S., SOUDANI, K., BOSCHETTI, L., BORGOGNO MONDINO, E. MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 64, p. 132-144, 2018.

THIEMIG, V., ROJAS, R., ZAMBRANO-BIGIARINI, M., LEVIZZANI, V., DE ROO, A. Validation of satellite-based precipitation products over sparsely Gauged African River basins. *Journal of Hydrometeorology*, 13, 1760-1783, 2012.

TRIGUEIRO, W.R., NABOUT, J.C., TESSAROLO, G. Uncovering the spatial variability of recent deforestation drivers in the Brazilian Cerrado, *Journal of Environmental Management*, v. 275, 111243, 2020.

TRIGUEIRO, W.R.; NABOUT, J.C.; TESSAROLO, G. Uncovering the spatial variability of recent deforestation drivers in the Brazilian Cerrado, *Journal of Environmental Management*, 275, 111243, 2020.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; NETTO, O. M. *Gestão da Água no Brasil*. 1ª. Ed. Brasília: UNESCO, 2001.

TUCCI, C.E.M. *Modelos Hidrológicos*. Porto alegre – RS. UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. p. 652. 1998.

VARMA, A. K. Measurement of Precipitation from Satellite Radiometers (Visible, Infrared, and Microwave): Physical Basis, Methods, and Limitations. In *Remote Sensing of Aerosols, Clouds, and Precipitation* (pp. 223-248). Elsevier, 2018.

VIANA, J.F.S., MONTENEGRO, S.M.G.L., SILVA, B.B., SILVA, R.M., SRINIVASAN, R., SANTOS, C.A.G., ARAUJO, D.C.S., GADELHA, C.T. Evaluation of gridded meteorological datasets and their potential hydrological application to a humid area with scarce data for Pirapama River basin, northeastern Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 243, p. 793-813, 2021.

WALKER, W. S.; GORELIK, S. R.; BACCINI, A.; ARAGON-OSEJO, J. L.; JOSSE, C.; MEYER, M.; MACEDO, M. N.; AUGUSTO, C.; RIOS, S.; KATAN, T.; SOUZA, A. A.; CUELLAR, S.; LLANOS, A.; ZAGER, I.; MIRABAL, G. D.; SOLVIK, K. K.; FARINA, M. K.; MOUTINHO, P.; SCHWARTZMAN, S. The role of forest conversion, degradation, and disturbance in the carbon dynamics of Amazon indigenous territories and protected areas. **Proceedings of the National Academy of Sciences**. 2020, 117 (6) 3015-3025; DOI: 10.1073 / pnas.1913321117.

WANG, Y.; TAN, S.; LIU, B.; YANG, Y. Estimating rainfall erosivity by incorporating seasonal variations in parameters into the Richardson model. *Journal of Geographical Sciences*, 27(3), 275-296, 2017.

WARDLOW, B.D., EGBERT, S. L. A comparison of MODIS 250-m EVI and NDVI data for crop mapping: A case study for southwest Kansas. *International Journal of Remote Sensing*, v. 31, n. 3, p. 805-830, 2010.

XING, Z., LI, Z.-L., DUAN, S.-B., LIU, X., ZHENG, X., LENG, P., GAO, M., ZHANG, X., SHANG, G. Estimation of daily mean land surface temperature at global scale using pairs of daytime and nighttime MODIS instantaneous observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v.178, p. 51-67, 2021.

XU, R.; TIAN, F.; YANG, L.; HU, H.; LU, H.; HOU, A. Ground validation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 rainfall products over southern Tibetan Plateau based on a high-density rain gauge network. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(2), 910-924, 2017.

YOON, J. H.; ZENG, N. An Atlantic influence on Amazon rainfall. *Climate dynamics*, 34(2-3), 249-264, 2010.

ZHAO, H.; MA, Y. Evaluating the Drought-Monitoring Utility of Four Satellite-Based Quantitative Precipitation Estimation Products at Global Scale. *Remote Sensing*, 11(17), 2019.

ZHAO, H.; REN, Z.; TAN, J. The spatial patterns of land surface temperature and its impact factors: spatial non-stationarity and scale effects based on a geographically weighted regression model. *Sustainability*, v. 10, p. 2242, 2018.

ZHOU, B., OKIN, G.S., ZHANG, J. Leveraging Google Earth Engine (GEE) and machine learning algorithms to incorporate in situ measurement from different times for rangelands monitoring. *Remote Sensing of Environment*, v. 236, 111521, 2020.

ZHOU, X.; WANG, Y.C. Dynamics of land surface temperature in response to land-use/cover change. *Geographical Research*, v. 49, n. 1, p. 23-36, 2011.