

UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS

DISSERTAÇÃO

DINÂMICA DE FOCOS DE CALOR NA AMAZÔNIA LEGAL

THAÍS MARCOLINO RIBEIRO

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS

DINÂMICA DE FOCOS DE CALOR NA AMAZÔNIA LEGAL

THAÍS MARCOLINO RIBEIRO

Sob orientação do Professor
Dr. Bruno Araujo Furtado de Mendonça

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de concentração em Conservação da Natureza

SEROPÉDICA, RJ
Agosto de 2023

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R484d Ribeiro, Thaís Marcolino, 1991-
 Dinâmica de focos de calor na Amazônia Legal / Thaís
 Marcolino Ribeiro. - Rio de Janeiro, 2023.
 36 f.: il.

 Orientador: Bruno Araujo Furtado de Mendonça.
 Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal Rural do
 Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciências
 Ambientais e Florestais, 2023.

 1. Amazônia legal. 2. Incêndios florestais . 3. El Niño..
 4. Focos de calor. 5. Geoprocessamento. I. Mendonça,
 Bruno Araujo Furtado de, 1981-, orient. II Universidade
 Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-
 Graduação em Ciências Ambientais e Florestais III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS

THAÍS MARCOLINO RIBEIRO

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, área de Concentração em Conservação da Natureza.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/08/2023

Dr. Bruno Araujo Furtado de Mendonça. UFRRJ.
(Orientador)

Dr. Marcel Carvalho Abreu. UFRRJ.

Dr. José Francisco de Oliveira Júnior. UFAL.



Emitido em 2023

TERMO Nº 1176/2023 - PPGCAF (12.28.01.00.00.00.27)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 25/10/2023 13:25)
BRUNO ARAUJO FURTADO DE MENDONCA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptSil (12.28.01.00.00.00.31)
Matrícula: ###456#4

(Assinado digitalmente em 26/10/2023 07:47)
MARCEL CARVALHO ABREU
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptCAmb (12.28.01.00.00.00.29)
Matrícula: ###400#9

(Assinado digitalmente em 25/10/2023 19:14)
JOSÉ FRANCISCO DE OLIVEIRA JÚNIOR
ASSINANTE
EXTERNOCPF:
###.###.894-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número: **1176**, ano: **2023**,
tipo:

TERMO, data de emissão: **25/10/2023** e o código de verificação: **7a4a225dc8**

DEDICATÓRIA

Dedicado à minha mãe e à minha vó.
Márcia Joana Marcolino Ribeiro e
Maria Joana Moyses Marcolino.

AGRADECIMENTOS

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

RESUMO

Ribeiro, Thaís. **Dinâmica de focos de calor na Amazônia Legal**. 2023. 36 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2023.

Na Amazônia Legal, o El Niño aumenta a temperatura e reduz a chuva e os efeitos dessas modificações na dinâmica de queimadas e incêndios florestais necessitam ser estudados. Portanto, o objetivo é analisar a dinâmica dos focos de calor relacionada ao El Niño na Amazônia Legal de 2012 a 2021. Com o auxílio do software QGIS Desktop 3.28.7, foi eliminada a redundância dos focos de calor disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) via BDqueimadas. Para análise da distribuição espacial dos focos foram elaborados mapas de calor via Índice de Densidade Kernel. Foi analisada a influência dos satélites (NPP-375, NOAA-20 e AQUA) sobre o total de focos. A influência de diferentes variáveis bioclimáticas na ocorrência dos focos de calor foi avaliada por meio da Análise de Componentes Principais (PCA) via software RStudio 2023.06.0. O coeficiente de correlação de Pearson (r) foi usado na avaliação da relação entre o número de focos e o Oceanic Niño Index (ONI). O satélite NPP apresentou o maior potencial de detecção de focos. No período de estudo, os Estados do Pará, Tocantins e Maranhão se destacam com os maiores registros de focos de calor. E as variáveis associadas à chuva exercem maior influência sobre a ocorrência de focos de calor na Amazônia Legal.

Palavras-chave: Amazônia legal. Incêndios florestais. Geoprocessamento. Focos de calor. El Niño.

ABSTRACT

Ribeiro, Thaís. **Dynamics of fire foci in the Legal Amazon**. 2023. 36 p. Dissertation (Master in Environmental and Forestry Sciences). Institute of Forests, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2023.

In the Legal Amazon, El Niño increases temperature and reduces rainfall and the effects of these changes on the dynamics of burning and forest fires need to be studied. Therefore, the objective is to analyze the dynamics of hot spots related to El Niño in the Legal Amazon from 2012 to 2021. With the help of the QGIS Desktop 3.28.7 software, the redundancy of hot spots made available by the National Institute for Space Research was eliminated. (INPE) via BDqueimadas. To analyze the spatial distribution of foci, heat maps were created using the Kernel Density Index. The influence of satellites (NPP-375, NOAA-20 and AQUA) on the total number of outbreaks was analyzed. The influence of different bioclimatic variables on the occurrence of hot spots was evaluated using Principal Component Analysis (PCA) via RStudio 2023.06.0 software. Pearson's correlation coefficient (r) was used to evaluate the relationship between the number of foci and the Oceanic Niño Index (ONI). The NPP satellite presented the greatest potential for spot detection. During the study period, the States of Pará, Tocantins and Maranhão stand out with the highest records of hot spots. And the variables associated with rain have a greater influence on the occurrence of hot spots in the Legal Amazon.

Keywords: Legal Amazon. Forest fires. Geoprocessing. Hot spots. El Niño.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	12
2.1	Queimadas e incêndios florestais na Amazônia Legal	12
2.2	El Niño e fogo na Amazônia Legal	12
2.3	Detecção e monitoramento de focos de calor por satélites ambientais.....	13
2.3.1	AQUA.....	14
2.3.2	SUOMI-NPP	14
2.3.3	NOAA-20.....	14
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1	Área de estudo	14
3.2	Análise dos dados	16
3.2.1	Exclusão de focos múltiplos	16
3.2.2	Extração das variáveis bioclimáticas	17
3.2.3	Análise de componentes principais (ACP)	18
3.2.4	Correlação com dados de ENOS	18
3.2.5	Densidade de Kernel	19
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
5	CONCLUSÕES	30
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia Legal (AL) é uma delimitação administrativa estabelecida pelo Governo Federal, para fins de planejamento e gestão do desenvolvimento que abrange nove estados brasileiros: Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins (SUDAM, 2023). A preservação e o desenvolvimento sustentável da região são objeto de discussão, tanto no Brasil, quanto no cenário internacional, uma vez que a região é conhecida por incluir, entre outras formações, a Floresta Amazônica, maior floresta tropical do mundo, que contempla a maior reserva de biodiversidade, de banco genético e a maior bacia hidrográfica da Terra (LIMA et al., 2020). A AL é o lar de diversas comunidades indígenas e tradicionais, que dependem diretamente dos recursos naturais da região para sua subsistência (ARAGÓN, 2018).

O fogo é um dos principais fatores de degradação nos ecossistemas Amazônicos (GABARDO, 2021). A queimada é considerada uma forma barata e eficiente de preparo para mudanças no uso e ocupação da terra (DE LIMA MOREIRA et al., 2019). Apesar de ser uma floresta tropical, parte destas queimadas acaba fugindo do controle e penetra na floresta sob a forma de incêndio florestal (NEPSTAD et al., 1999; ERI et al., 2020).

Os incêndios são frequentes, especialmente na estação seca e em anos de seca extrema isso se intensifica. Anos anormalmente secos estão associados a anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM), e assim causa altas temperaturas e baixa umidade. Essas condições são favoráveis para a rápida propagação de incêndios (SILVA, 2022).

Segundo Nobre et al., (2005) e Copertino et al., (2019), os desmatamentos recorrentes e as mudanças climáticas afetam a susceptibilidade da floresta às queimadas, em função de sua fragmentação, das alterações induzidas na estrutura da vegetação, do aumento da temperatura e da redução da chuva. As queimadas agora encontram fragmentos florestais menos densos, menos úmidos, mais inflamáveis e com menor capacidade de tamponar o fogo, e, assim, avançam sobre essas matas e empurram os seus limites ano após ano.

O uso de ferramentas de geoprocessamento constitui uma prática imprescindível, principalmente quando se trata do estudo de dados de áreas com grandes extensões e/ou de difícil acesso, como a AL. O sensoriamento remoto representa uma ferramenta particularmente útil para obter essas informações. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) monitora os focos de calor no território nacional por meio de imagens de satélites e disponibiliza esses dados gratuitamente via Banco de Dados de Queimadas (BDQueimadas) – (FREIRE et al., 2021). O estudo dos focos de calor no ambiente é importante para o planejamento e mitigação dos impactos negativos sobre a biodiversidade, a qualidade do ar, sobre os solos e sobre o clima, sendo fundamental entender como se dá sua espacialização no território, suas causas, consequências e os fatores potencializadores de sua ocorrência.

O presente estudo analisou a dinâmica dos focos de calor na Amazônia Legal para o período de 2012 a 2021, sendo considerada a detecção dos focos de calor por diferentes satélites ambientais e o uso recente de sensores com melhor resolução espacial. Foi explorada a distribuição espacial dos focos; a influência dos satélites SUOMI-NPP, NOAA-20 e AQUA sobre o número total de focos de calor; a influência de diferentes variáveis bioclimáticas na ocorrência dos focos de calor; e a correlação entre número de focos de calor e os dados de El Niño para a região.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Queimadas e incêndios florestais na Amazônia Legal

A Amazônia Legal enfrenta diversos desafios e pressões. A crescente demanda por terras, recursos naturais e commodities agrícolas, tem contribuído para degradação ambiental na região, trazendo prejuízos à qualidade de vida das comunidades locais e à sustentabilidade em longo prazo da região (SILVA & SILVA, 2022).

As queimadas na Amazônia Legal estão diretamente ligadas a mudanças no uso e cobertura do solo, o manejo do fogo é visto como a solução mais rápida e econômica para geração de renda na agropecuária (DE AVILA, 2019). Segundo Schroeder et al. (2005), o maior número de queimadas no Brasil, é registrado nos biomas Cerrado e Amazônia, na região denominada de Arco do desmatamento.

São raros episódios de incêndios florestais de origem natural na Amazônia Legal (PIVELLO, 2011). De maneira geral, os incêndios são mais observados nos períodos de seca, que se iniciam no mês de julho. É nessa época que ocorrem também os maiores picos de desmatamento (CAÚLA et al., 2016).

A maior parte dos biomas brasileiros é suscetível a incêndios, em maior ou menor intensidade. O bioma Amazônia é um bioma sensível ao fogo, uma vez que a vegetação não apresenta adaptações para sobreviver a ele. (MYERS & BATALHA, 2006). Um dos impactos ecológicos do fogo na floresta é o aumento da probabilidade de este tornar-se uma característica permanente da paisagem. (NEPSTAD et al., 1999).

Segundo o IBAMA (2023), os biomas brasileiros dependentes do fogo são o Cerrado, Pantanal e o Pampa. Nestes ambientes, o uso do fogo por meio das queimas controladas têm papel fundamental na prevenção dos grandes incêndios florestais e na manutenção da biodiversidade. Por outro lado, em biomas como Amazônia e Mata Atlântica, que são sensíveis ao fogo, devem ser incentivadas ações de prevenção para que não ocorra o fogo, ou estratégias alternativas ao uso do fogo.

A Lei 12.651, de 28 de maio de 2012, que aborda a proteção da vegetação nativa, trata em seu capítulo IX “da proibição do uso de fogo e do controle dos incêndios”. O Art. 40 deste capítulo dispõe sobre a Política Nacional de Manejo e Controle de Queimadas, Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais, indicando a necessidade instrumentos para a análise dos impactos das queimadas, entre outras coisas, sobre as mudanças climáticas. E ainda aponta que tal política deve observar os cenários de mudanças climáticas e potenciais aumentos de risco de ocorrência de incêndios florestais.

2.2 El Niño e fogo na Amazônia Legal

O El Niño Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno climático natural, atmosférico-oceânico, capaz de produzir anomalias na temperatura da superfície do mar (TSM) do Oceano Pacífico Equatorial. O ENOS possui duas fases distintas, a fase fria (La Niña) e a fase quente (El Niño), e para sua caracterização, a média móvel trimestral da anomalia de TSM deve se sustentar por no mínimo três meses consecutivos, ficando abaixo de $-0,5^{\circ}\text{C}$ para casos de La Niña, e acima de $0,5^{\circ}\text{C}$ para eventos de El Niño (DA CUNHA, et al., 2011; FAO, 2014; NOAA, 2023).

O El Niño ocorre com o aumento da temperatura nas águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial, provocando uma reorganização da circulação atmosférica, que resulta em eventos climáticos extremos ao redor do mundo (HAM, 2018). Este fenômeno é responsável pelo aumento da temperatura e redução da precipitação em vários locais, incluindo a região Amazônica (MARENGO, 2007).

A região da Amazônia Legal desempenha um papel importante no ciclo de carbono planetário, sendo crucial na regulação climática, uma vez que absorve grandes quantidades de dióxido de carbono, um dos principais gases de efeito estufa. (NOBRE et al., 2007). Brown et al. (2006) encontraram que as mudanças climáticas em função de atividades antrópicas, como o desmatamento e as queimadas, podem influenciar a frequência e a intensidade dos eventos de El Niño.

Nos anos de El Niño as condições climáticas influenciam a ocorrência dos incêndios. Uma das catástrofes ambientais mais conhecidas na Amazônia brasileira ocorreu em 1998, ano em que foi registrado um evento El Niño com alta intensidade e 39 mil km² de florestas pegaram fogo (KIRCHOFF & ESCADA, 1998; COPERTINO et al., 2019.). Tal ocasião motivou a criação do Decreto nº 2.959, de 10 de fevereiro de 1999, que dispõe sobre medidas a serem implementadas na Amazônia Legal, para monitoramento, prevenção, educação ambiental e combate a incêndios florestais.

2.3 Detecção e monitoramento de focos de calor por satélites ambientais

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) é uma instituição brasileira que possui expertise na área de monitoramento ambiental. O INPE mantém um sistema de monitoramento chamado Programa Queimadas, que registra e analisa dados de focos de calor em todo o território brasileiro. O Banco de Dados de Queimadas (BDQueimadas), é a plataforma pela qual o INPE disponibiliza esses dados.

O monitoramento acontece via satélites orbitais, que detectam os focos de calor (SETZER, 2019). Registrar e monitorar incêndios a partir de observações terrestres é um processo trabalhoso e caro, que resulta em um registro incompleto. Os satélites, no entanto, permitem detectar e monitorar uma variedade de incêndios, fornecendo informações sobre a localização, duração, tamanho, temperatura e potência desses incêndios (NOAA, 2023).

Para montar sua série histórica, de 1998 a 2002, o INPE utilizou como satélite de referência o NOAA-12 (sensor AVHRR), e a partir de 2002 passou a utilizar o AQUA (sensor MODIS). Quando este último deixar de operar, o que é esperado para os próximos anos, uma vez que ultrapassou consideravelmente sua vida útil prevista de seis anos, o satélite de referência passará a ser o SUOMI-NPP (sensor VIIRS), dos EUA, lançado em outubro de 2011, utilizado no monitoramento de focos pelo INPE desde 2012 (INPE, 2023).

Atualmente, são usadas três gerações de sensores: o AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), mais antigo; o MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), de tecnologia intermediária; e o VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), mais moderno. Os satélites mais recentes, SUOMI-NPP e NOAA-20 (National Oceanic and Atmospheric Administration), com seu sensor VIIRS, que possui resolução espacial de 375 m, detectam 10 vezes mais focos que os satélites AQUA e TERRA, com o sensor MODIS a bordo.

Em alguns casos os dados de focos de calor necessitam de um processamento prévio antes de serem utilizados, a fim de evitar possíveis superestimativas de incêndios florestais ou queimadas, quando se utilizam dados de satélite com maior resolução espacial. Esse processamento é necessário, pois a relação foco de calor e queimadas/incêndios não é direta. Se uma queimada for muito extensa, ela será detectada em alguns pixels vizinhos, ou seja, vários focos estarão associados a uma única grande queimada (RIBEIRO et. al, 2020).

2.3.1 AQUA

O satélite AQUA é uma missão da NASA (Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço) dos Estados Unidos. O objetivo principal do satélite AQUA é estudar a água na Terra, incluindo os processos relacionados à atmosfera, oceanos, lagos, rios, calotas polares e ciclos hidrológicos.

O AQUA é o atual satélite de referência, começou a ser utilizado pelo INPE em 2002 e possui o sensor MODIS. Para montar sua série histórica, o INPE utiliza dados de apenas uma das duas passagens diárias do satélite AQUA sobre a Amazônia, que ocorre por volta das 14 horas (fuso de Brasília), no período do dia em que há usualmente mais queimadas.

O sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) foi configurado para fornecer dados sobre a dinâmica da biosfera terrestre visando à compreensão dos processos que ocorrem na superfície da terra, nos oceanos e na atmosfera inferior, causadas por atividades antrópicas ou pela própria natureza. Permite a geração de imagens com resolução espacial 1.000 m e possui frequência de revisita entre 1 e 2 dias no Equador (PIROMAL ET al., 2008).

2.3.2 SUOMI-NPP

O S-NPP (Suomi National Polar Orbiting Partnership), ou SUOMI-NPP-, é o primeiro da nova geração de satélites de órbita polar da série JPSS (Joint Polar Satellite System) lançado em 28 de outubro de 2011, operado pelo EUA. O satélite passa sobre o Brasil e parte da América do Sul aproximadamente no horário das 02h às 03h (manhã) e das 14h às 17h (tarde). Não passa no mesmo local todo dia por tratar-se de um satélite de órbita polar (SILVA, 2018; INPE, 2023).

Em 2012, o BDQueimadas passou a disponibilizar os produtos gerados a partir do sensor Visible Infrared Imager Radiometer Suite (VIIRS). Esse é um dos cinco sensores a bordo do SUOMI-NPP. O VIIRS possui resolução espacial de 375 m, com capacidade de detectar níveis consideravelmente baixos de luz visível e infravermelho (MILLER et al., 2013). Esse sensor conseguiu aliar a boa resolução temporal (12 horas) com melhoras na resolução espacial (LIBONATI et al., 2015; SANTOS 2017).

2.3.3 NOAA-20

O Joint Polar Satellite System-1 (JPSS-1), ou NOAA-20 é o segundo satélite de órbita polar da série JPSS, foi colocado em órbita pela NASA/NOAA no dia 18 de novembro de 2017, passando a ser chamado oficialmente de NOAA-20. Este satélite está equipado com o VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), com resolução espacial de 375 m. Tem a capacidade de circular a Terra de polo a polo com cobertura total do globo 2 vezes por dia (NASA, 2023). Começou a ser utilizado pelo INPE a partir de 2019.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A AL corresponde à área de atuação da Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia – SUDAM, delimitada no Art. 2º da Lei Complementar no 124, de 03/01/2007. Com uma área de 5.114.798,30 km², representa cerca de 60% do território brasileiro (LEMONS & SILVA, 2012).

A região faz fronteira com sete países da América do Sul (AS), é composta por nove estados brasileiros (Figura 1), somando 772 municípios distribuídos da seguinte forma: 52 municípios de Rondônia, 22 municípios do Acre, 62 do Amazonas, 15 de Roraima, 144 do Pará, 16 do Amapá, 139 do Tocantins, 141 do Mato Grosso, seguido por 181 municípios do Maranhão, dos quais, 21 deles, estão parcialmente integrados à AL.

A AL apresenta uma grande diversidade de ecossistemas, traduzidos por diferentes condições de vegetação, clima e solos. Abriga cerca de 60% da Floresta Amazônica e parte de outros biomas importantes, tais como, o Cerrado (37%) e o Pantanal (40%) (HANUSCH, 2023).

Segundo FEARNSTIDE (2022), existem 28 tipos de vegetação natural na AL. A vegetação predominante são as florestas ombrófila e estacional (IBGE, 2021). A parte sul da Amazônia Legal e o nordeste de Roraima são cobertos, principalmente, por vegetação savana. Entre essa faixa de vegetação savana e o chamado “coração da Amazônia”, cuja vegetação é a floresta ombrófila densa, estende-se uma longa faixa de floresta ombrófila aberta, a qual representa a transição entre os biomas Cerrado e Amazônia (MARTHA et al.; 2011).

O clima da Amazônia é basicamente tropical: Af: tropical sem estação seca; Am: tropical de monção; Aw: tropical com estação seca definida; e As: tropical com verão seco (ALVARES et al., 2013).

O processo de formação econômica e social da região, baseado no extrativismo vegetal e mineral, resultou em problemas sociais como concentração de terra e de renda, desigualdade social, conflitos pela posse da terra e pelos recursos naturais. De 30 milhões de brasileiros, a Amazônia Legal possui R\$ 623 bilhões em PIB, representando 9% do PIB nacional, mais de três quartos de sua população vive em cidades (grandes e pequenas). Trinta e seis por cento da população da região vive em situação de pobreza (IBGE, 2021).

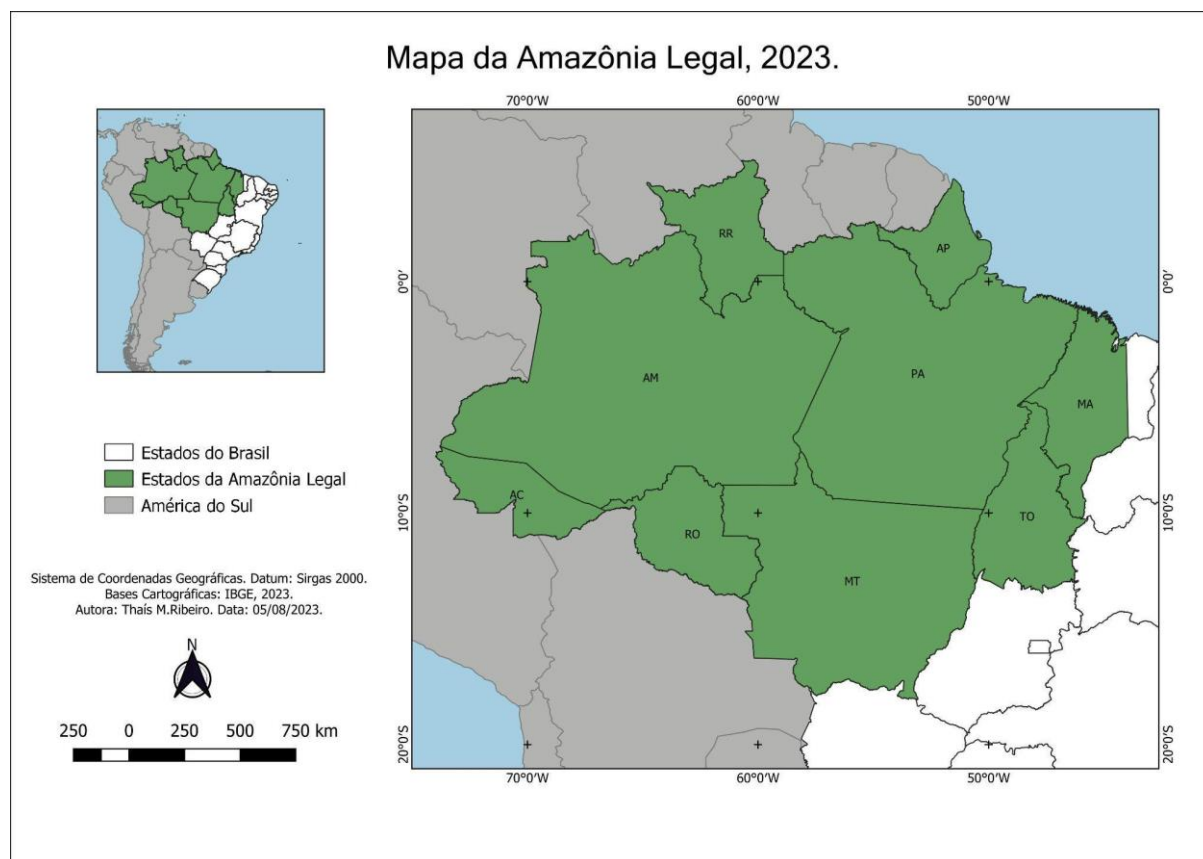


Figura 1 Localização da Amazônia Legal. Fonte: A autora, 2023.

3.2 Análise dos dados

3.2.1 Exclusão de focos múltiplos

Os dados dos focos de calor compõe a série temporal de 2012 a 2021, na escala anual, em arquivos no formato *shapefile* (extensão .shp), no site do BDQueimadas (www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas), do INPE, incluindo os satélites de interesse para o estudo: AQUA SUOMI-NPP e NOAA-20. Cada arquivo contém pontos georreferenciados que representam a localização dos focos detectados pelos satélites ambientais. Além disso, o *shapefile* também contém atributos adicionais, como data e hora do registro do foco de calor, estado, município e bioma.

Para a validação dos focos de calor foi utilizada a metodologia adotada por Ribeiro et al. (2020) e De Assis Barros (2022). A redundância dos focos foi eliminada no programa Quantum GIS (QGIS), através de processos de identificação, agrupamento e de exclusão dos pontos repetidos (Figura 2). Na execução do modelo de exclusão de redundância, o arquivo de entrada são os focos de calor. *Buffer's* foram gerados a partir da resolução espacial do sensor de cada satélite. Posteriormente, a ferramenta *Dissolver* identificou os focos com a mesma data, os polígonos de mesma data que estavam no raio de alcance da resolução espacial do sensor foram unidos em um mesmo polígono. Por fim, com a ferramenta *Centroides* foi criado um ponto central para cada novo polígono e assim foi gerado um novo arquivo vetorial contendo os focos de calor sem duplicidade de informação, ditos filtrados.

Após, obter novo arquivo vetorial com a exclusão de pontos repetidos, foi realizada uma análise dos números de focos de calor ao longo dos anos, com e sem a retirada de pontos duplicados, sendo calculados os percentuais de redução.

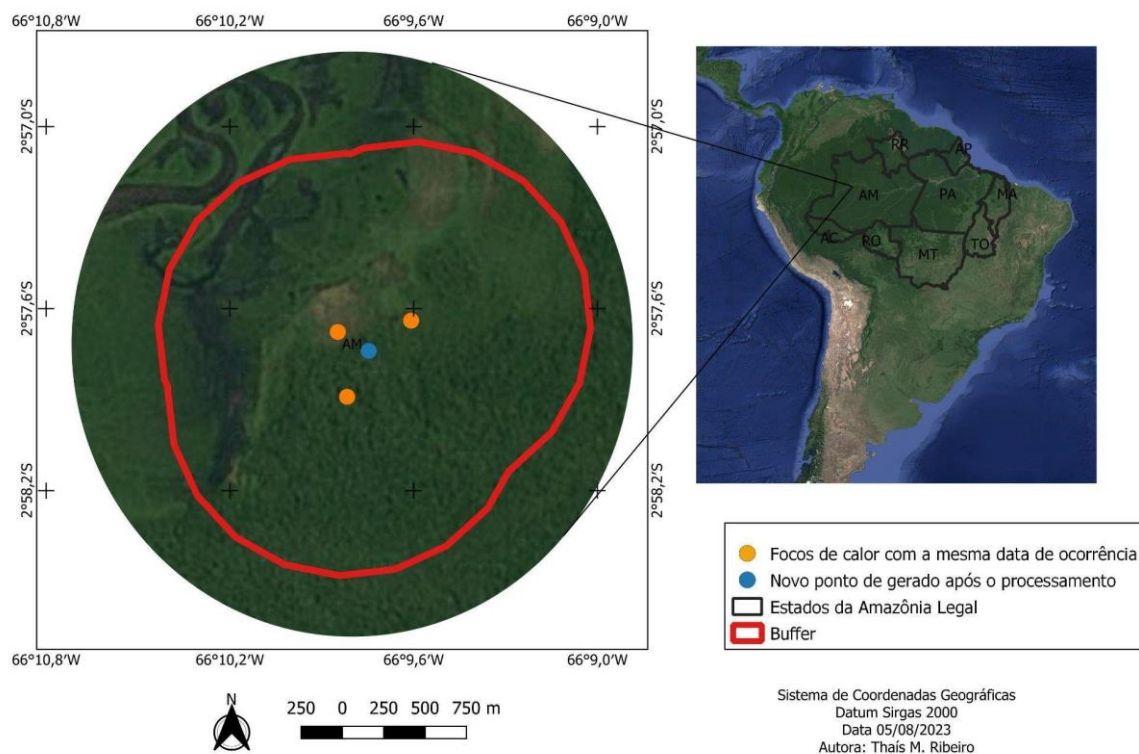


Figura 2 Exemplo da exclusão de dados redundantes. Fonte: A autora, 2023.

3.2.2 Extração das variáveis bioclimáticas

As variáveis bioclimáticas foram obtidas através do WorldClim (<https://www.worldclim.org/data/index.html>), um banco de dados de dados meteorológicos globais, desenvolvido para fins de pesquisa, que fornece informações detalhadas sobre várias variáveis climáticas em todo o mundo, como temperatura, precipitação, umidade e radiação solar. Os dados do WorldClim são derivados de uma combinação de observações de estações meteorológicas terrestres e dados de satélite. Essas informações são processadas usando técnicas de interpolação espacial para criar mapas climáticos contínuos com uma resolução espacial de 1 km² (HARRIS et al., 2020; FICK & HIJMANS, 2017; WORLDCLIM, 2023).

Esses dados são disponibilizados em arquivos do tipo raster (formato matricial), onde a cena tem uma estrutura de células de grade. Uma identidade de feição única é atribuída a cada célula da grade, normalmente um número (ex., montante de precipitação), ou seja, um valor que representa as condições da área coberta por aquela célula. A célula é a unidade mínima de mapeamento (pixel), o que significa que é o menor tamanho com que qualquer feição da paisagem pode ser representada e mostrada.

Foram escolhidas 68 variáveis. Para os dados climáticos mensais de temperatura mínima (°C), temperatura média (°C), temperatura máxima (°C) e precipitação (mm), cada download é um arquivo “zip” contendo 12 arquivos GeoTiff (.tif), um para cada mês do ano (janeiro é 1; dezembro é 12). Foram obtidos também dados de elevação e de 19 variáveis “bioclimáticas” disponibilizados no site worldclim.org. As variáveis bioclimáticas são derivadas dos valores mensais de temperatura e precipitação para gerar variáveis biologicamente mais significativas. As variáveis bioclimáticas representam tendências anuais. Elas são codificadas da seguinte forma:

- BIO1 = Temperatura Média Anual
- BIO2 = Faixa Diurna Média (Média mensal (temperatura máxima - temperatura mínima))
- BIO3 = Isotérmica (BIO2/BIO7) (×100)
- BIO4 = Sazonalidade da Temperatura (desvio padrão ×100)
- BIO5 = Temperatura máxima do mês mais quente
- BIO6 = Temperatura mínima do mês mais frio
- BIO7 = Faixa anual de temperatura (BIO5-BIO6)
- BIO8 = Temperatura média do trimestre mais úmido
- BIO9 = Temperatura média do trimestre mais seco
- BIO10 = Temperatura média do trimestre mais quente
- BIO11 = Temperatura média do trimestre mais frio
- BIO12 = Precipitação anual
- BIO13 = Precipitação do mês mais chuvoso
- BIO14 = Precipitação do mês mais seco
- BIO15 = Sazonalidade da precipitação (coeficiente de variação)
- BIO16 = Precipitação do trimestre mais úmido
- BIO17 = Precipitação do trimestre mais seco
- BIO18 = Precipitação do trimestre mais quente
- BIO19 = Precipitação do trimestre mais frio

Após a criação dos arquivos em formato *shapefile*, contendo os focos de calor filtrados por ano (camada de pontos georreferenciados), os valores das 68 variáveis escolhidas para a análise foram extraídos dos arquivos raster, através da ferramenta *Point Sampling Tool*, no

software QGIS 3.22. Foram criadas camadas de pontos, com as localizações fornecidas e atributos obtidos das células raster.

3.2.3 Análise de componentes principais (ACP)

Por se tratar de um método multivariado bastante utilizado em análises de variáveis ambientais, a ACP foi escolhida como ferramenta estatística neste trabalho. Dentro deste contexto, o principal objetivo foi utilizar a ACP para identificar a relação entre variáveis bioclimáticas e a ocorrência de focos de calor.

O método ACP se baseia na redução de variáveis, pelas combinações lineares das variáveis originais, preservando parte da variabilidade do conjunto de dados. O objetivo da redução é facilitar a interpretação de dados com menos variáveis e identificar as variáveis de maior influência (SOUZA et al., 2017).

As combinações geradas são denominadas de CP (componente principal) e possuem independência estatística, ou seja, são não correlacionadas. Cada CP é estimada com o propósito de reter, em ordem de estimação, a variação total contida nos dados iniciais. Isto é, as primeiras componentes principais contêm a maior parte da variabilidade total dos dados (MANLY et al., 2008)

A ACP foi realizada para o ano de 2019 considerando os focos de calor (sem redundâncias e os valores das variáveis bioclimáticas, com o auxílio do software R, para cada um dos três satélites escolhidos neste estudo (AQUA, SUOMI-NPP e NOAA-20). A escolha pelo ano de 2019 se deve ao fato de que este foi o ano em que o INPE passou a disponibilizar os dados do NOAA-20 e foi neste ano que o satélite detectou o maior número de focos de calor em comparação aos demais anos do período estudado. A partir daí foram rodadas análises por satélite, considerando essas 10 variáveis, nos seguintes períodos: SUOMI-NPP de 2012 a 2021, AQUA de 2012 a 2021 e NOAA-20 de 2019 a 2021.

3.2.4 Correlação com dados de ENOS

Os dados do Índice Niño Oceânico (ONI - Oceanic Niño Index) foram adquiridos na plataforma do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Quando o ONI é maior ou igual a $+0,5^{\circ}\text{C}$ ocorre o fenômeno El Niño e quando o índice é menor ou igual a $-0,5^{\circ}\text{C}$ ocorre o fenômeno de La Niña (FAO, 2014).

Para identificar as duas fases de ENOS, na Tabela 1, os períodos quentes (El Niño) foram destacados em vermelho e os períodos frios (La Niña) foram destacados em azul. Foi considerada metodologia de classificação do CPTEC-INPE para definir em quais valores de ONI ocorrem as diferentes intensidades dos episódios de El Niño: fraco ($\leq 1,0^{\circ}\text{C}$ e $\geq 0,5^{\circ}\text{C}$), moderado ($< 1,5^{\circ}\text{C}$ e $> 1,0^{\circ}\text{C}$) e forte ($\geq 1,5^{\circ}\text{C}$); e La Niña: fraco ($\geq -1,0^{\circ}\text{C}$ e $\leq -0,5^{\circ}\text{C}$), moderado ($> -1,5^{\circ}\text{C}$ e $< -1,0^{\circ}\text{C}$) e forte ($\leq -1,5^{\circ}\text{C}$).

Tabela 1. Índice Niño Oceânico ao longo dos anos. Fonte: NOAA, (2023).

ANO	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ	El Niño	La Niña
2012	-0,9	-0,7	-0,6	-0,5	-0,3	0	0,2	0,4	0,4	0,3	0,1	-0,2	-	Fraco
2013	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3	-	-
2014	-0,4	-0,5	-0,3	0	0,2	0,2	0	0,1	0,2	0,5	0,6	0,7	Fraco	-
2015	0,5	0,5	0,5	0,7	0,9	1,2	1,5	1,9	2,2	2,4	2,6	2,6	Forte	-
2016	2,5	2,1	1,6	0,9	0,4	-0,1	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,6	Forte	Fraco
2017	-0,3	-0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	-0,1	-0,4	-0,7	-0,8	-1	-	Fraco
2018	-0,9	-0,9	-0,7	-0,5	-0,2	0	0,1	0,2	0,5	0,8	0,9	0,8	Fraco	Fraco
2019	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	0,1	0,2	0,3	0,5	0,5	Fraco	-
2020	0,5	0,5	0,4	0,2	-0,1	-0,3	-0,4	-0,6	-0,9	-1,2	-1,3	-1,2	-	Moderado
2021	-1	-0,9	-0,8	-0,7	-0,5	-0,4	-0,4	-0,5	-0,7	-0,8	-1	-1	-	Fraco

Para analisar a influência do ONI sobre número de focos de calor utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r), determinado com o auxílio do software Excel, onde o número anual de focos foi a variável dependente (x) e a média anual de ONI a variável independente (y). O r foi calculado a fim de indicar a forma como as duas variáveis se relacionam e seu grau de relação linear, o resultado varia de -1 a 1. Quando o valor de r é igual a 1 tem-se uma correlação perfeita positiva e quando r é -1, tem-se uma correlação perfeita negativa. r igual a 0 indica ausência de correlação.

3.2.5 Densidade de Kernel

Após a obtenção dos focos de calor foram calculadas as suas densidades, dentro da região da Amazônia Legal, utilizando o estimador de densidade de Kernel, através da ferramenta *Spatial Analyst Tools* do software QGIS. O estimador da densidade de Kernel plota a intensidade pontual de um determinado fenômeno, correspondendo ao raio de influência dele. Os resultados gerados através da densidade de Kernel, variam de 1 na posição do ponto a 0 na borda do raio de influência, facilitando a identificação de áreas com maior incidência de focos de calor e o seu comportamento espacial (FILHO et al., 2009).

Esse método foi utilizado a fim de espacializar os focos de calor e assim permitir uma análise da concentração da ocorrência dos incêndios. A partir da densidade de Kernel, foram criados mapas para cada ano do período estudado que foram classificados, de acordo com sua cor e tonalidade, da seguinte forma: vermelho indica densidade muito alta; laranja indica densidade alta; amarela densidade média; verde significa densidade baixa; e branco densidade muito baixa. Essa classificação por cores é comumente usada e pode ser vista, por exemplo, em Souza et al. (2013) e Barbosa (2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o satélite NOAA-20, no período de estudo, antes da aplicação do método de exclusão de focos redundantes, somaram-se 2.378.723 de ocorrências de focos de calor. Após a exclusão completa dos dados redundantes, esse número caiu para 802.176 focos, totalizando uma redução de aproximadamente 66,28%. A maior quantidade de focos de calor foi

observada no ano de 2020. A Tabela 2 indica a redução após a exclusão da redundância em cada ano.

Tabela 2. Dados do satélite NOAA-20, antes e depois da filtragem.

Ano	Antes	Depois	% de redução
2019	771742	264694	65,70
2020	905177	291435	67,80
2021	701804	246047	64,94
TOTAL	2378723	802176	66,28

Para o satélite SUOMI-NPP, no período de 2012 a 2021, antes da aplicação do método de exclusão de focos redundantes, somaram-se 8.758.708 de ocorrências de focos de calor. Após a exclusão completa dos dados redundantes, esse número reduziu para 3.059.803 de focos, totalizando uma diminuição de aproximadamente 65,06%. A maior quantidade de focos de calor foi observada no ano de 2015. A Tabela 3 indica a redução após a exclusão da redundância em cada ano.

Tabela 3. Dados do satélite SUOMI-NPP, antes e depois da filtragem.

Ano	Antes	Depois	% de redução
2012	972358	324878	66,59
2013	533518	232903	56,35
2014	783247	302354	61,40
2015	1161788	421467	63,72
2016	856050	312296	63,52
2017	1100537	355890	67,66
2018	589950	235122	60,15
2019	916954	295809	67,74

2020	1136870	340594	70,04
2021	707436	238490	66,29
Total	8758708	3059803	65,07

Para o satélite AQUA, no período de 2012 a 2021, antes da aplicação do método de exclusão de focos redundantes, somaram-se 1.230.810 de ocorrências de focos de calor. Após a exclusão completa dos dados redundantes, houve uma redução para 709.450 focos, totalizando uma diminuição de aproximadamente 42,36% dos dados no total. A maior quantidade de focos de calor foi observada no ano de 2015. A Tabela 4 indica a redução após a exclusão dos focos redundantes em cada ano.

Tabela 4. Dados do satélite AQUA, antes e depois da filtragem.

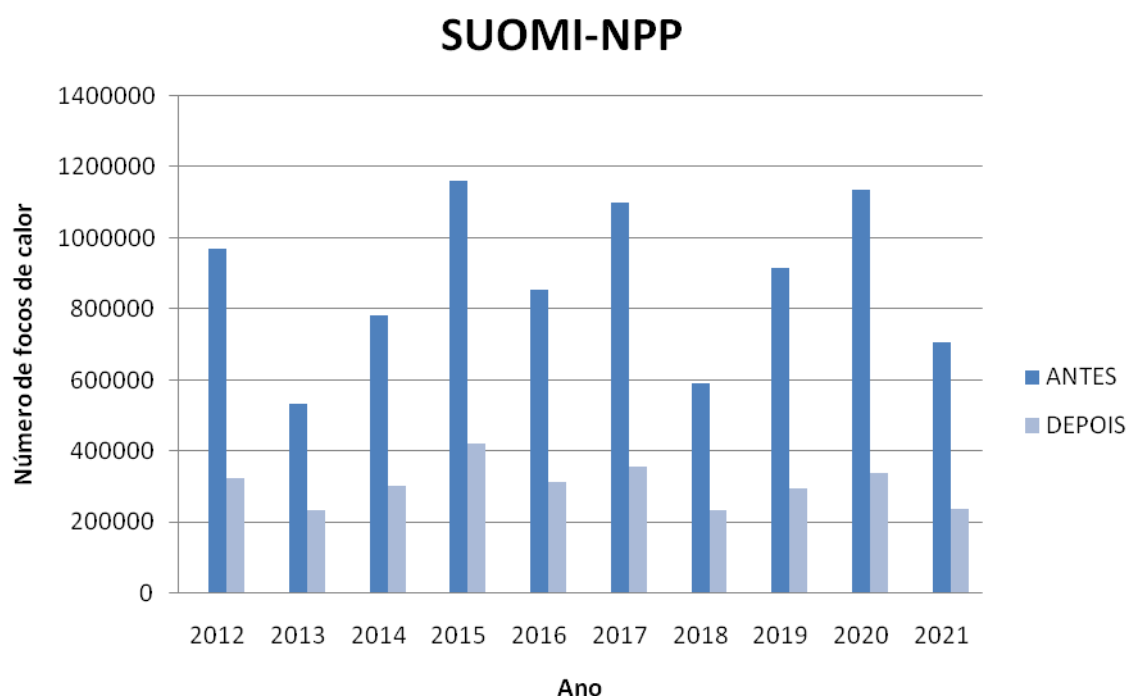
Ano	Antes	Depois	% de redução
2012	136650	76890	43,73
2013	85021	53450	37,13
2014	119827	71305	40,49
2015	146366	86518	40,89
2016	124045	72743	41,36
2017	149411	83253	44,28
2018	90408	54572	39,64
2019	126089	70951	43,73
2020	150783	81524	45,93
2021	102210	58244	43,02
TOTAL	1230810	709450	42,36

Para o período de 2012 a 2021, o número de focos de calor detectados pelo atual satélite de referência, o satélite AQUA, representou apenas 23,19% do total de focos de calor que o satélite SUOMI-NPP foi capaz de registrar. White (2022) encontrou uma relação 5,13 vezes maior para os níveis de detecção do NPP comparado com o AQUA (satélite de referência) e atribuiu as mudanças na relação S-NPP/AQUA a fatores como características da amostragem, área geográfica analisada, tempo de passagem dos satélites, tipo de vegetação predominante, entre outros. Estes dados revelam o potencial do SUOMI-NPP para ser utilizado como referência, após a exclusão dos focos redundantes.

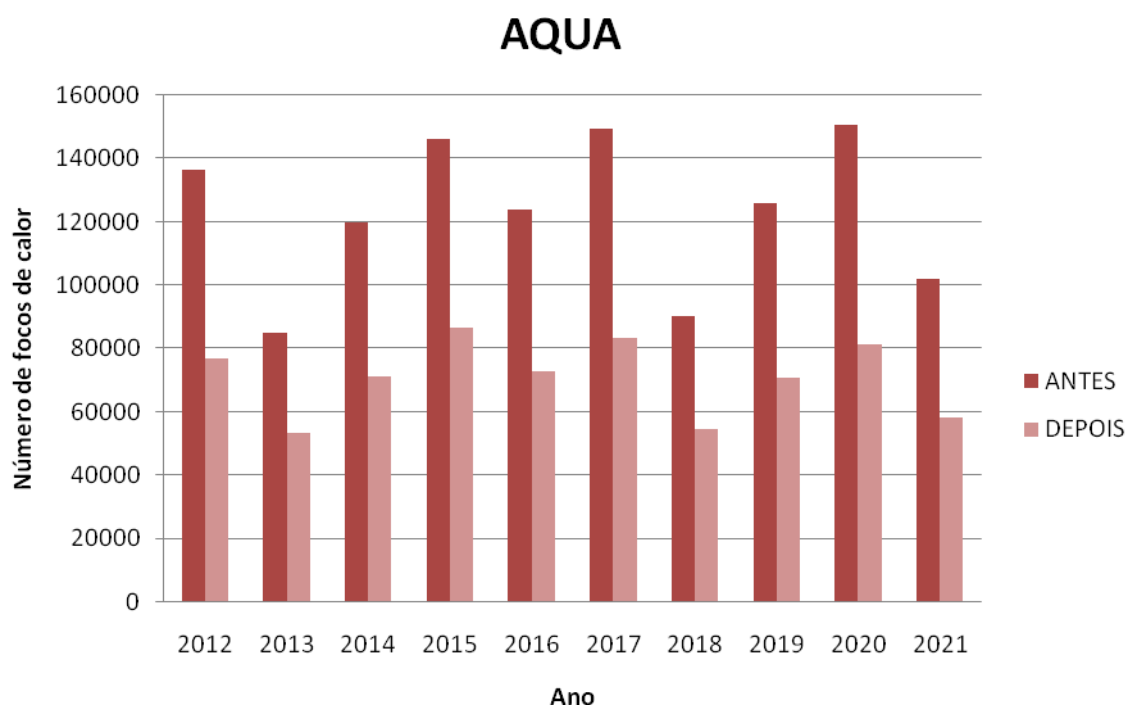
Para o período de 2019 a 2021, quando o INPE passou a incluir os dados do satélite NOAA-20 no BDQueimadas, é possível observar que o valor total de focos de calor detectado por ele (802.176) foi menor, mas próximo do valor de focos de calor detectados pelo satélite SUOMI-NPP (874.893) para o mesmo período. O ano de 2013 foi o que apresentou o menor número de focos de calor para os satélites SUOMI-NPP e AQUA. Já para o satélite NOAA-20 o menor número foi observado no ano de 2021 (Figura 4).

Tanto o NOAA-20, quanto o SUOMI-NPP, registraram aproximadamente quatro vezes mais focos que o AQUA, isso se deve, principalmente, à resolução mais detalhada (375 metros) dos dois primeiros, ambos com sensor VIIRS a bordo, além da maior disponibilidade de imagens diárias.

(a)



(b)



(c)

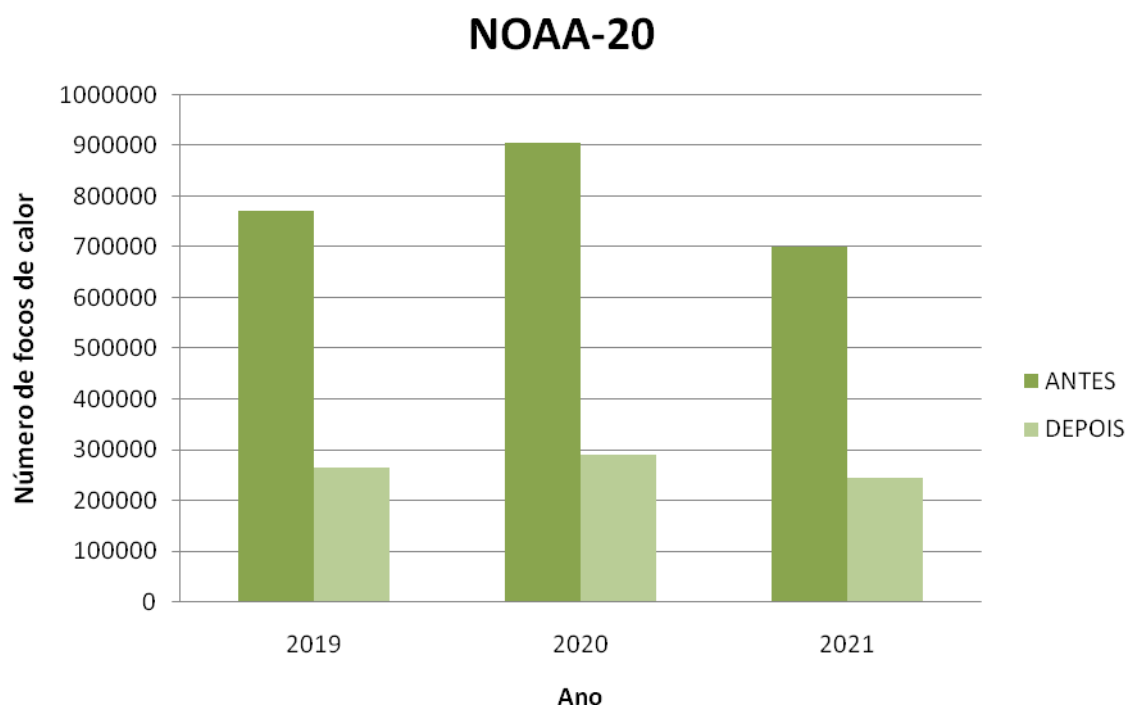
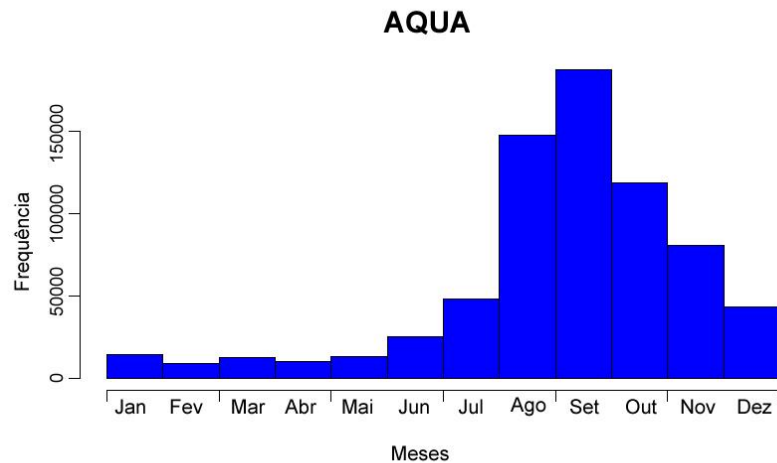


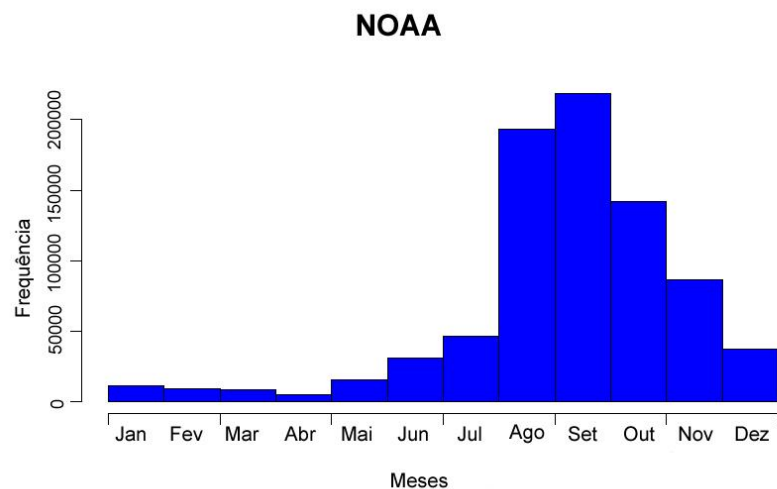
Figura. 4: Quantitativos anuais de focos antes e depois do processo de filtragem, para os três satélites avaliados: NPP (a), AQUA (b) e NOAA (c).

Os três satélites avaliados após a exclusão dos dados obtiveram resultados de ocorrências mensais totais similares, com predomínio dos incêndios no mês de setembro (Figura 5). O satélite SUOMI-NPP detectou mais focos no mês de outubro em relação ao AQUA e NOAA, o que também pode estar relacionado com o melhor desempenho deste satélite na detecção dos incêndios. Alguns estudos apontam o período de agosto a outubro como a estação seca na região amazônica (Yokelson et al., 2007; Heyer et al., 2018; Xu et al., 2020; Pope et al., 2020), sendo também indicado como o mesmo período em que ocorre aumento no número de queimadas e no desmatamento (MOURA et al., 2019; MORGAN et al., 2019; REDDINGTON et al., 2015).

(a)



(b)



(c)

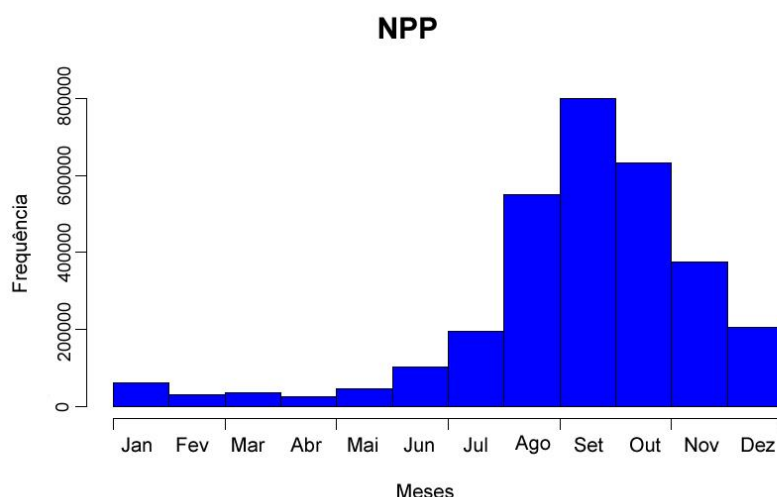


Figura 5 - Distribuição do total de focos filtrados para os 3 satélites avaliados: AQUA (a), NOAA (b) e NPP (c).

O El Niño causa secas na Amazônia que, por sua vez, provê condições para incêndios destrutivos. Os ciclos de El Niño, La Niña e anos neutros implicam em diferenças nos acumulados de chuva (ALMEIDA et al., 2017). O El Niño promove redução nos totais precipitados na Amazônia, o que favorece queimadas, gerando perda de áreas florestadas, de carbono e biodiversidade (FEARNSIDE, 2006). As consequências da redução da área da floresta Amazônica vem sendo estudadas e acredita-se que haverá redução da chuva e intensificação dos efeitos das mudanças climáticas (GUIMBERTEAU et al., 2017; DE OLIVEIRA et al., 2023).

A correlação encontrada entre o número de focos de incêndios com o índice ENOS anual para o satélite SUOMI-NPP foi de 0,65, para o AQUA de 0,47 e para o NOAA-20 de 0,19. Destaca-se que para o NOAA foram avaliados apenas três anos, o que justifica a baixa correlação dos dados, uma vez que esses anos tiveram ocorrência de El Niño fraco (2019) e La Niña moderado (2020) e fraco (2021). Diversos estudos apontam a interferência do El Niño no aumento dos incêndios na região amazônica (RIBEIRO et al., 2020). Entretanto, Xu et al. (2021) avaliaram a dinâmica de incêndios na região Amazônica entre 2016-2019 e apontaram que mais de 90% dos incêndios foram associados ao desmatamento para fins agrícolas, sem relação com uma seca excepcional.

Através da PCA feita para o ano de 2019, as 10 variáveis com maior valor de importância foram identificadas: bio19; bio12; bio16; elev; prec04; prec05; bio18; prec03; prec06; bio01. Com a PCA feita a partir dessas 10 variáveis para os demais anos estudados: SUOMI-NPP: 2012 a 2021, AQUA- 2012 a 2021 e NOAA-20 2019 a 2021, foram identificadas as quatro variáveis bioclimáticas de maior influência na ocorrência dos focos de calor, considerando os dados de cada satélite (Tabela 05).

Os satélites SUOMI-NPP E NOAA-20, que operam com o mesmo sensor (VIIRS), apresentaram como resultado as mesmas 4 primeiras variáveis, com contribuição acima de 10% na Dim-1, como componentes principais: Precipitação (mm) no mês de abril (prec04); Precipitação (mm) no mês de maio (prec05); Precipitação do trimestre mais frio (bio19); Precipitação do trimestre mais úmido (bio16). Já para o satélite AQUA, a variável elevação teve maior valor de importância, além das variáveis bioclimáticas associadas à precipitação e temperatura, sendo elas: Precipitação do trimestre mais quente (bio18); Temperatura Média Anual (bio01) e Precipitação do trimestre mais frio (bio19).

Tabela 5. Quatro principais variáveis bioclimáticas

	SUOMI-NPP	NOAA-20	AQUA
1	prec04	prec04	elev
2	prec05	prec05	bio18
3	bio19	bio19	bio01
4	bio16	bio16	bio19

Fatores como variáveis bioclimáticas (precipitação e seca) (Aragão et al., 2007), dinâmica de mudança da cobertura do solo (Kelley et al., 2021) e sazonalidade e impactos do El Niño (Da Silva Júnior et al., 2019) estão entre as variáveis mais utilizadas para estudar a dinâmica do fogo na Amazônia. Variáveis bioclimáticas, como a precipitação, tem forte relação com incêndios florestais em todos os biomas da AS. A estação seca desempenha um papel importante na influência da dinâmica do fogo (BALCH et al., 2015).

SINGH & ZHU (2021) analisaram a variação dos padrões espaciais e temporais do fogo em função de variáveis bioclimáticas, topográficas e antropogênicas na Floresta Amazônica em anos com e sem El Niño. O estudo concluiu que a queda da chuva e o aumento das temperaturas têm forte impacto na dinâmica do fogo (tamanho, duração, expansão e velocidade) para anos de El Niño.

Para Makhaya et al. (2022) existe influência das variáveis BIO18 e elevação na ocorrência de incêndios, entre clima e topografia, além de regularem a carga dos materiais combustíveis, são os principais impulsionadores do comportamento do fogo. Nos meses de abril ocorreram as menores detecções de incêndios ao longo de todo período avaliado (2012-2021), abril representa o último mês do período chuvoso na maior parte da área estudada, também conhecido como mês de transição entre o regime climático da região (FISCH et al., 1998; ALMEIDA et al., 2017).

Drumond (2023), identificou as diferenças de concentrações de queimadas entre os estados da Amazônia Legal e apontou que dependendo do relevo e do clima, entre outros fatores, as taxas de desmatamento podem ser completamente diferentes de um estado para o outro. Medeiros (2023) abordou metodologias de análise da vulnerabilidade ambiental, um processo resultante de fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais, que determinam a probabilidade e a escala dos danos de algum tipo de impacto e/ou de determinado perigo, destacando a importância da variável “relevo”, como elemento fundamental no processo de saída e entrada de matéria e energia do sistema ambiental.

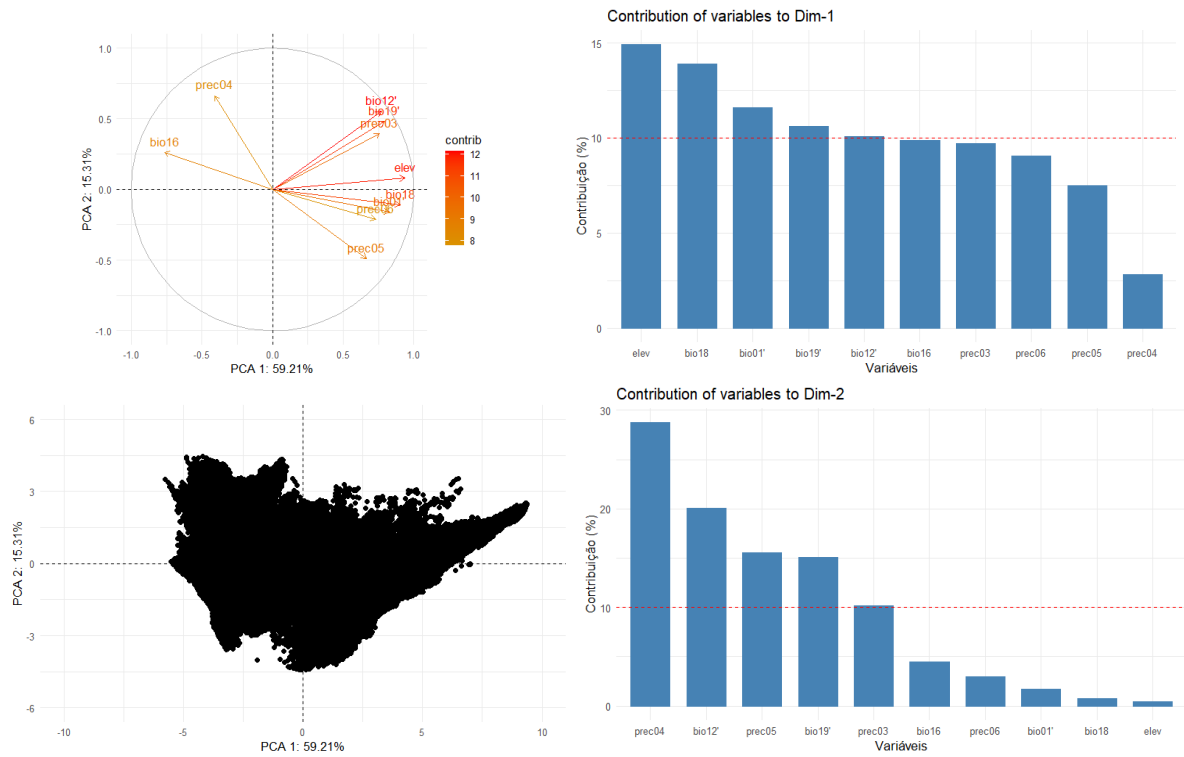


Figura 5: Resultados da ACP para o satélite AQUA.

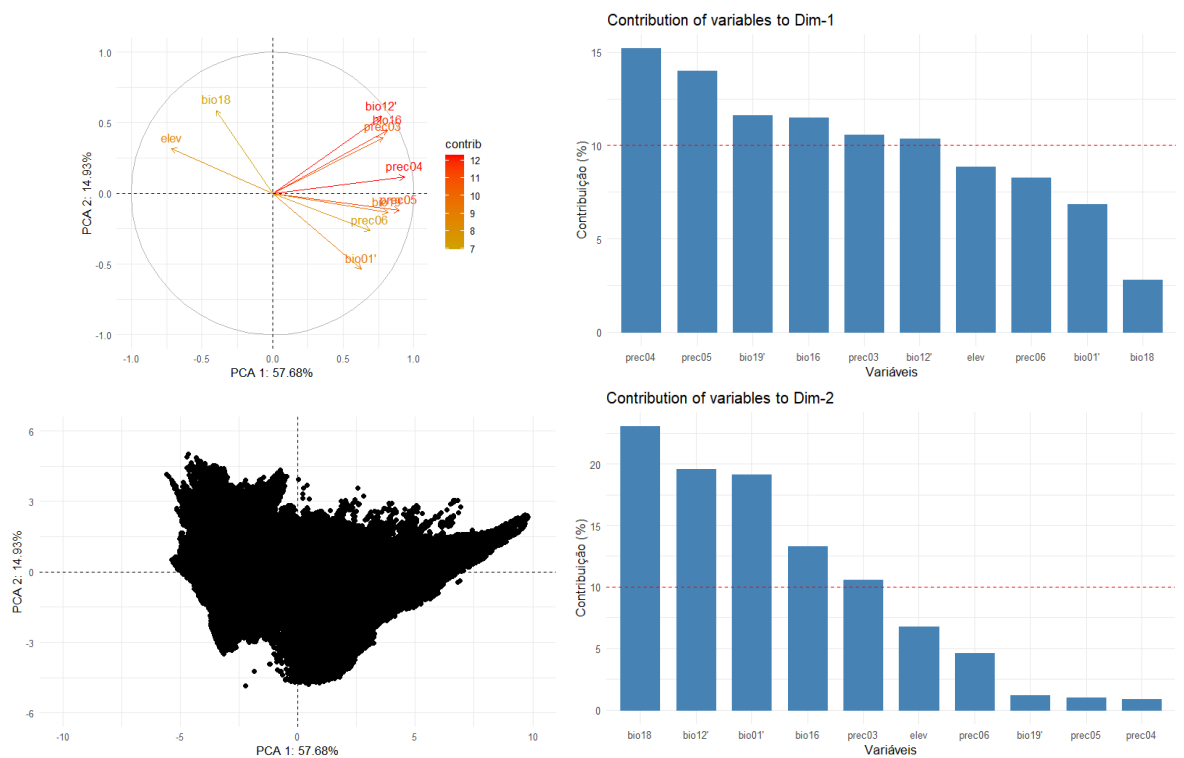


Figura 6: Resultados da ACP para o satélite NOAA-20.

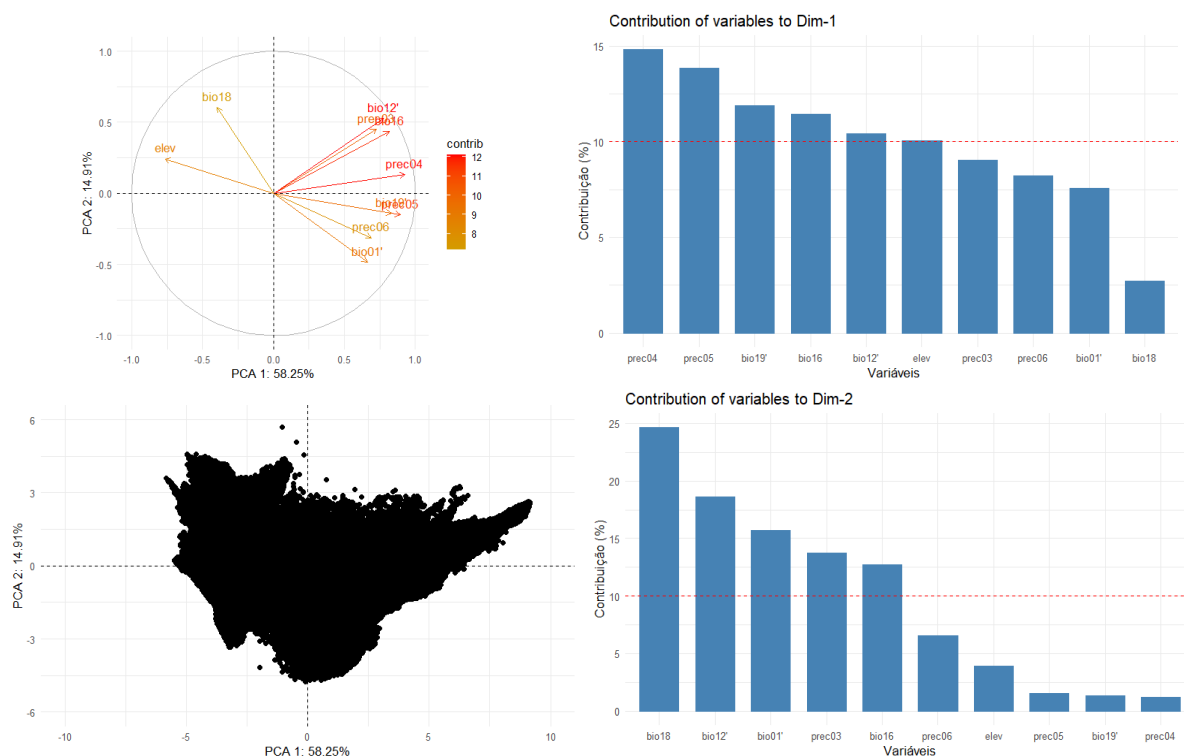


Figura 7: Resultados da ACP para o satélite SUOMI-NPP.

A Figura 8 mostra os mapas com a da densidade de Kernel, muito úteis quando há uma grande quantidade e concentração de focos de incêndios (Ramos et al. 2011) apresentam vantagens em relação a uma análise visual simples, uma vez que demonstra a, não somente a distribuição dos focos, mas também diferentes densidades. De acordo com os mapas gerados após a aplicação da técnica de análise espacial Kernel para a área da AL, foi possível inferir as zonas onde houve uma maior densidade de focos de calor e sua distribuição no período analisado (RIBEIRO et al., 2020). Os mapas foram gerados com base nos dados do satélite SUOMI-NPP porque a quantidade de focos de calor captados por ele foi mais expressiva do que qualquer outro satélite em órbita utilizado pelo INPE.

A partir da análise dos mapas foi possível observar áreas específicas com maiores concentrações de focos de incêndios para o período estudado (2012-2021), com uma densidade classificada como muito alta nos estados do Pará, Maranhão, Rondônia e Mato Grosso (Figura 8). Esta região compreende o Arco de Desmatamento e, associada aos incêndios, a supressão da vegetação ocorre também de maneira não uniforme, presente especialmente na parte sul e leste da AL (AMARAL et al., 2022).

Os anos de maior quantidade de ocorrência de incêndios foram diferentes entre os estados. No Maranhão, ocorreram maiores densidades de focos nos anos de 2012, 2015 e 2017, enquanto que no Mato Grosso, o ano com maior densidade de focos de calor foi 2020, tendo os anos anteriores um padrão constante de muito baixa e baixa densidade de focos. No ano de 2015 no Amazonas observa-se uma faixa contínua, com baixa e média densidade, correspondendo aos incêndios marginais à calha do rio Amazonas. Vale ressaltar que o ano de 2015 ocorreu seca extrema (ALMEIDA et al., 2017).

Nos mapas apresentados na Figura 8 foram destacadas as sedes de alguns dos municípios localizados nas áreas com maiores densidades de focos de calor, no sentido de contribuir para análises e possíveis interpretações dos fenômenos. A região do município de Poconé-MT teve destaque no ano de 2020, com densidade muito alta. Já na região de Nova

Esperança - PA variou a densidade de incêndios em todos os anos de baixa a alta. As áreas com alta intensidade são relacionadas em geral com a proximidade com o Arco do Desmatamento (AMARAL et al. 2022).

O município de São Félix do Xingu, apresentou densidade variando de alta a muito alta nos anos de 2015, 2017 e 2020. Neris (2020), apontou este município como um dos que se destaca no estado do Pará, com números alarmantes de focos de calor devido a incêndios associados à mudança do uso e ocupação da terra.

O Estado de Roraima apresentou maiores densidades de focos de incêndio nos anos 2016 e 2019. Os impactos diretos do El Niño combinados com as pressões antropogênicas foram considerados poderosos impulsionadores para a ocorrência de incêndios no estado de Roraima, no Brasil, de 2015 a 2016 (FONSECA et al., 2017).

Em relação aos Estados do Mato Grosso e Maranhão, ainda pela ocorrência em ambos os Estados do bioma Cerrado, onde o regime edafoclimático tende naturalmente a ocorrência de eventos de queimada. Em termos ecológicos o fogo é um elemento essencial do Cerrado (COCHRANE et al., 1999), sendo necessária a implementação de políticas públicas de uso adequado do fogo para conservação deste bioma (DURIGAN e RATTER, 2016).

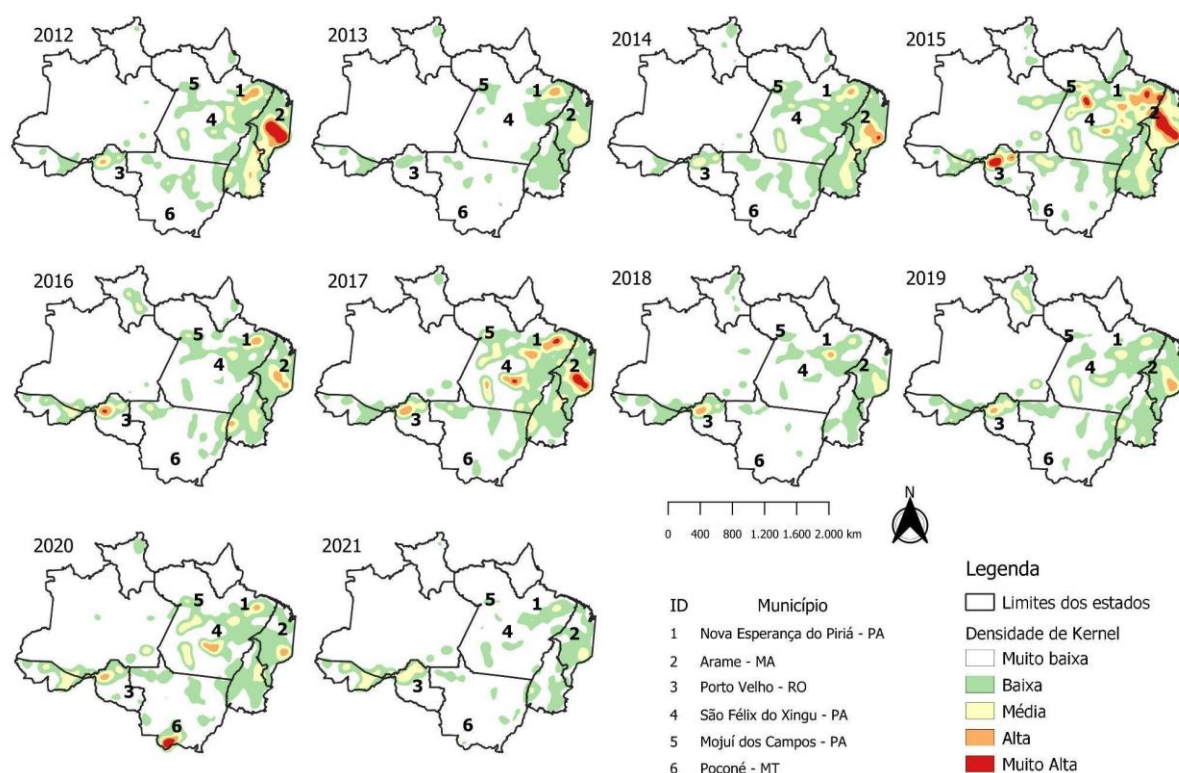


Figura 8: Mapa de Kernel dos focos de calor para a Amazônia Legal.

A Figura 8 ilustra que no ano de 2015 ocorreu a maior densidade de focos de calor. De acordo com a Tabela 1, no período 2015-2016 ocorreu um evento de anomalia climática de grande intensidade, o fenômeno El Niño (MARENGO e ESPINOZA, 2016; ALMEIDA et al., 2017). Queimadas em anos com expressiva ausência de chuvas, podem levar incêndios florestais a atingirem uma intensidade elevada e de forma descontrolada. Situação como esta aconteceu em 2016, quando a interação entre queimadas e seca intensa atingiu mais de 525 mil hectares de florestas (SILVA et al., 2018).

Em termos de distribuição espacial dos focos de calor, a transição entre a floresta e o cerrado está sob grande pressão devido à sua proximidade aos centros populacionais importantes, e à procura de madeira e carvão vegetal no Centro-Sul do País. A produção de grãos, notadamente a soja, é uma fonte de pressão que aumentou nos ecótonos da floresta/cerrado (FEARNSIDE e FERRAZ, 2022). Estes tipos de vegetação são mais fáceis de desmatar que tipos florestais mais densos. Os dados de satélite indicam que a zona de transição floresta/cerrado sofre o desmatamento mais rápido (INPE, 2023).

Projetos rodoviários planejados, tais como a BR-319 (Manaus - Porto Velho), implicam na abertura de áreas grandes de floresta para a entrada de agentes de desmatamento. O aumento da infraestrutura de transporte representa uma garantia de níveis significativos de atividade de desmatamento e queimadas no futuro. Conciliar a manutenção da floresta com o desenvolvimento socioeconômico da região está entre os maiores desafios para o Brasil.

5 CONCLUSÕES

- As porcentagens de redundância dos focos de calor mostra a importância e influência dos diferentes satélites utilizados neste tipo de análise. Para o satélite NOAA-20, no período de estudo, o maior registro de focos de calor é observado em 2020. Ao contrário, dos satélites SUOMI-NPP e AQUA em 2015.
- O satélite NPP apresenta o maior potencial de detecção de focos de incêndio associados às variáveis bioclimáticas e topográficas.
- O estudo coloca em evidência a vulnerabilidade do ecossistema amazônico diante da ocorrência dos incêndios e das mudanças climáticas e ajuda a delinear as áreas da Amazônia Legal que mais registram a ocorrência de fogo.
- Dentre todas as variáveis climáticas usadas no estudo, as que se referem ao regime de chuvas na região, especialmente as referentes à chuva no período seco, são as que exercem maior influência sobre a ocorrência de focos de calor na Amazônia Legal.
- Ao longo dos anos os Estados do Pará, Tocantins e Maranhão possuem os maiores registros de focos de calor. A informação geoespacial é de grande importância para o contínuo monitoramento das queimadas e incêndios florestais e para o planejamento de políticas públicas para a preservação ambiental da região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, Felipe Gonçalves et al. Evolução Recente do Desflorestamento na Amazônia Legal: Supressão, Trajetórias e seus Padrões. MENEZES, PML et al. **Cartografias do Ontem, Hoje e Amanhã**. Appris, Rio de Janeiro, 2022.
- ALMEIDA, C. T. ; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. ; DELGADO, R. C. ; CUBO, P. ; RAMOS, M. C. . Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973-2013. **International Journal of Climatology** , v. 37, p. 2013-2026, 2017.
- ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorological Magazine**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ARAGAO, L. E. O. C. et al. Finger prints of the 1997/1998 and 2005 droughts in Amazonian rainforests. **Geophys. Res. Lett.**, v. 34, p. L07701, 2007.
- ARAGÓN, Luis Eduardo. A dimensão internacional da Amazônia: um aporte para sua interpretação/The international dimension of the Amazon: a contribution for its interpretation. **Revista Nera**, n. 42, p. 14-33, 2018.
- BALCH, Jennifer K. et al. The susceptibility of southeastern Amazon forests to fire: insights from a large-scale burn experiment. **Bioscience**, v. 65, n. 9, p. 893-905, 2015.
- BARBOSA, Maria Lucia Ferreira et al. Recent trends in the fire dynamics in Brazilian Legal Amazon: Interaction between the ENSO phenomenon, climate and land use. **Environmental Development**, v. 39, p. 100648, 2021.
- BROWN, I. F. et al. Fires in rainforests of south western Amazonia: multi-national satellite imagery for monitoring and for informing the public. **EOS Trans**, v. 87, p. 253-264, 2006.
- CAÚLA, R. H.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F.; GOIS, G.; DELGADO, R. C.; PIMENTEL, L.C.G.; TEODORO, P. E. Non parametric statistics applied to fire foci obtained by meteorological satellites and their relationship to the MCD12Q1 product in the state of Rio de Janeiro, Southeast - Brazil. **Land Degradation & Development**, n.25, p.225-236. 2016.
- COPERTINO, Margareth et al. Desmatamento, fogo e clima estão intimamente conectados na Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 71, n. 4, p. 04-05, 2019.
- DA CUNHA, Gilberto Rocca et al. El Niño/La Niña-Oscilação Sul e seus impactos na agricultura brasileira: fatos, especulações e aplicações. **Revista Plantio Direto**-Janeiro/Fevereiro de, v. 2010, p. 19, 2011.
- DA SILVA JÚNIOR, Luiz Augusto Siciliano et al. Fire dynamics in extreme climatic events in western amazon. **Environmental Development**, v. 32, p. 100450, 2019.
- DA SILVA, Richarde Marques; LOPES, Aricson Garcia; SANTOS, Celso Augusto Guimarães. Deforestation and fires in the Brazilian Amazon from 2001 to 2020: Impacts on rainfall variability and land surface temperature. **Journal of Environmental Management**, v. 326, p. 116664, 2023.

DE ASSIS BARROS, Luizmar et al. Fire in the Atlantic Rainforest: an analysis of 20 years of fire foci distribution and their social-ecological drivers. **Geocarto International**, v. 37, n. 16, p. 4737-4761, 2022.

DE AVILA, S. R. S. Estudo exploratório sobre dinâmica do desmatamento em assentamentos localizados no território portal da Amazônia. **Retratos de Assentamentos**, v. 22, n. 1, p. 139-152, 2019.

DE LIMA MOREIRA, Willian Carlos; ALMEIDA, Marllus Rafael Negreiros; DA SILVA, Sonaira Souza. **Dinâmica espaço-temporal das queimadas no período de 2013-2017, no Vale do Juruá, Acre, Brasil**, 2019.

DEMATTE, J.L.I.; DEMATTE, J.A.M. Manejo de solos e produtividade agrícola. In: Congresso Latino Americano de Ciências Do Solo, 13., 1996. **Anais...** Embrapa: Águas de Lindóia, 1996.

DE OLIVEIRA SERRÃO, Edivaldo Afonso et al. Climate and land use change: future impacts on hydropower and revenue for the amazon. **Journal of Cleaner Production**, v. 385, p. 135700, 2023.

DRUMOND, Rafael Mourão. **O que as fronteiras da Amazônia Legal nos contam sobre as diferenças de desmatamento entre estados**. 2023.

DURIGAN, Giselda; RATTER, James A. The need for a consistent fire policy for Cerrado conservation. **Journal of Applied Ecology**, v. 53, n. 1, p. 11-15, 2016.

ERI, M. ; SILVA JUNIOR, C. A. ; LIMA, M. ; SCALA, N. L. ; OLIVEIRA JÚNIOR, José Francisco de ; CAPRISTO-SILVA, G. F. ; CAIONE, G. ; PERES, C. . Capitalizing on opportunities provided by pasture sudden death to enhance livestock sustainable management in Brazilian Amazonia. **Environmental Development** , v. 1, p. 100499, 2020.

FAO. **Understanding the drought impact of El Niño on the global agricultural areas: An assessment using FAO's Agricultural Stress Index (ASI)**. 2014.

FEARNSIDE, Philip M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. **Acta amazônica**, v. 36, p. 395-400, 2006.

FEARNSIDE, Philip M. Destruição e conservação da floresta amazônica. 2022.

FEARNSIDE, Philip M.; FERRAZ, João. Uma análise de lacunas de conservação da vegetação da Amazônia. **Floresta Amazônica**, p. 193, 2022.

FICK, Stephen E.; HIJMANS, Robert J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International journal of climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017.

FILHO, E. B. S.; TELES, L. J. S.; SANTOS NETO, L. A.; Ocorrência dos focos de calor no estado de Rondônia em 2007. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v.21, n.01. p. 123-140, 2009.

FISCH, Gilberto; MARENGO, José A.; NOBRE, Carlos A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta amazônica**, v. 28, p. 101-101, 1998.

FONSECA, Marisa G. et al. Climatic and anthropogenic drivers of northern Amazon fires during the 2015–2016 El Niño event. **Ecological applications**, v. 27, n. 8, p. 2514-2527, 2017.

FREIRE, B., FANALLI, A. C. C., BRAVO, J. V. M., CASTRO, P. I. D. S., & ZUCCHI, V. P. **Um compêndio de plataformas livres e técnicas para o estudo e monitoramento de incêndios florestais no Brasil**, 2021.

GABARDO, Gislaine; SARZEDAS, Carolina Galvão; DA SILVA, Henrique Luis. Queimadas na Amazônia brasileira: **Brasil em chamas**. 2021.

GUIMBERTEAU, Matthieu et al. Impacts of future deforestation and climate change on the hydrology of the Amazon Basin: a multi-model analysis with a new set of land-cover changes scenarios. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 3, p. 1455-1475, 2017.

HAM, Y. G. El Niño events will intensify under global warming. **Nature**.v.564, p. 192-193, 2018.

HANUSCH, Marek. **Equilíbrio Delicado para a Amazônia Legal Brasileira-Um Memorando Econômico (Portuguese)**, 2023.

HARRIS, Ian et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate data set. **Scientific data**, v. 7, n. 1, p. 109, 2020.

HEYER, Joshua P. et al. The impacts of recent drought on fire, forest loss, and regional smoke emissions in low land Bolivia. **Biogeosciences**, v. 15, n. 14, p. 4317-4331, 2018.

HUNTINGFORD, Chris et al. Using a GCM analogue model to investigate the potential for Amazonian forest die back. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 177-185, 2004.

IBAMA. Instituto Brasileiro... Disponível em: <<https://www.gov.br/ibama/pt-br/aceso-a-informacao/perguntas-frequentes/incendios-florestais#manejo-integrado>>. Acesso em 20/06/2023.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>> Acesso em: 20/06/2021.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em < <http://www.inpe.br/>>. Acesso em 22/06/2023.

JONES, Chris et al. Global climate change and seu carbono stocks; predictions from two contrasting models for the turn over of organic carbon in soil. **Global Change Biology**, v. 11, n. 1, p. 154-166, 2005.

KELLEY, Douglas I. et al. Low meteorological influence found in 2019 Amazonia fires. **Biogeosciences**, v. 18, n. 3, p. 787-804, 2021.

KIRCHHOFF, V. W. J. H., ESCADA, P. A. S. O mega incêndio do século – 1998. São José dos Campos, SP: Transtec, 1998.

LEMOS, André Luiz F.; SILVA, José de Arimatéia. Desmatamento na Amazônia Legal: evolução, causas, monitoramento e possibilidades de mitigação através do Fundo Amazônia. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 1, p. 98-108, 2012.

LIBONATI, R., DACAMARA, C. C., SETZER, A. W., MORELLI, F., & MELCHIORI, A. E. An Algorithm for Burned Area Detection in the Brazilian Cerrado Using 4 μm MODIS Imagery. **Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 15782-15803, 2015.

LIMA, Letícia S. et al. Feedbacks between deforestation, climate, and hydrology in the Southwestern Amazon: implications for the provision of ecosystem services. **Landscape ecology**, v. 29, p. 261-274, 2014.

LIMA, M. ; VALE, J. C. E. ; COSTA, G. M. ; SANTOS, R. C. ; CORREIA FILHO, W. L. F. ; GOIS, G. ; OLIVEIRA JÚNIOR, José Francisco de ; TEODORO, P. E. ; ROSSI, F. S. ; SILVA JUNIOR, C. A. . The Forests in the Indigenous Lands in Brazil in Peril. **Land use policy** , v. 90, p. 1-3, 2020.

MAKHAYA, Z.; ODINDI, J.; MUTANGA, O. The influence of bioclimatic and topographic variables on Grass land fire occurrence with in an urbanized landscape. **Scientific African**, v. 15, p. e01127, 2022.

MANLY, Bryan FJ; ALBERTO, Jorge A. Navarro. Métodos estatísticos multivariados: uma introdução. **Bookman Editora**, 2019.

MARENGO, J.A.; **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. Brasília: MMA; 2007.

MARENGO, José Antonio; ESPINOZA, Jhan Carlo. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033-1050, 2016.

MARTHA JUNIOR, Geraldo Bueno; CONTINI, Elisio; NAVARRO, Zander. **Caracterização da Amazônia Legal e macrotendências do ambiente externo**. 2011.

MEDEIROS, Rafael Brugnolli et al. Vulnerabilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Buriticupu, Maranhão-Brasil: o relevo como Elemento Chave. **Sociedade & Natureza**, v. 35, 2023.

MILLER, S. D.; STRAKA, W.; MILLS, S. P.; ELVIDGE, C. D.; LEE, T. F.; SOLBRIG, J.; WEISS, S. C. Illuminating the capabilities of the Suomi National Polar-orbiting Partnership (NPP) visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) day/nightband. **Remote Sensing**, v. 5, n. 12, p. 6717-6766, 2013.

MORGAN, William T. et al. Non-deforestation drivers of fires are increasingly important sources of aerosol and carbon dioxide emissions across Amazonia. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 16975, 2019.

MOURA, Marks Melo et al. Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 1639-1651, 2019.

MYERS, Ronald L.; BATALHA, Margaret. Convivendo com o Fogo-Manutenção dos ecossistemas e subsistência com o manejo integrado do fogo. **The Nature Conservancy-Iniciativa Global para o Manejo do Fogo**: Tallahassee, USA, 2006.

NASA. National Aeronautics and Space Administration Disponível em: <<https://eosps.nasa.gov/missions/joint-polar-satellite-system-1>>. Acesso em 20/06/2023.

NEPSTAD, D. C.; VERÍSSIMO, A.; ALENCAR, A.; NOBRE, C. A.; LIMA, E.; LEFEBVRE, P. A.; SCHLESINGER, P.; POTTER, C.; MOUTINHO, P. R. S.; MENDOZA, E.; COCHRANE, M. A.; BROOKS, V. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, n. 398, p. 505–508, 1999.

NERIS, João Paulo Ferreira et al. Uso de geotecnologias na análise espacial dos focos de calor no município de São Félix do Xingu, Pará. **Geografia: Publicações Avulsas**, v. 2, n. 1, p. 395-419, 2020.

NOAA Disponível em: <<https://www.nesdis.noaa.gov/our-environment/dust-ash-fire/fire>>. Acesso em 20/06/2023.

NOBRE, C.; Assad, E.D. “Mudança ambiental no Brasil. Em Terra na estufa”, edição especial **Scientific American Brasil**, no 12, pp. 70-75. 2005.

NOBRE, Carlos A.; SAMPAIO, Gilvan; SALAZAR, Luis. Mudanças climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 22-27, 2007.

PIROMAL, Rodrigo Alexandre Sbravatti et al. Utilização de dados MODIS para a detecção de queimadas na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 38, p. 77-84, 2008.

PIVELLO, V. R. The use of fire in the cerrado and Amazonian rain forests of Brazil: Past and present. **Fire Ecology**, v. 7, n. 1, p. 24–39, 2011.

POPE, Richard J. et al. Substantial increases in Eastern Amazon and Cerrado biomass burning-sourced tropospheric ozone. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 3, p. e2019GL084143, 2020.

RAMOS, Andrey Bethânia Rodrigues; NASCIMENTO, ERP do; OLIVEIRA, MJ de. Temporada de incêndios florestais no Brasil em 2010: análise de série histórica de 2005 a 2010 e as influências das chuvas e do desmatamento na quantidade dos focos de calor. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 15, p. 7902-7909, 2011.

REDDINGTON, C. L. et al. Air quality and human health improvements from reductions in deforestation-related fire in Brazil. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 10, p. 768-771, 2015.

RIBEIRO, Thais Marcolino et al. Fire foci assessment in the Western Amazon (2000–2015). **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 2, p. 1485-1498, 2021.

SANTOS, João Flávio Costa dos. **Dinâmica florestal e detecção de ocorrências do fogo em área do domínio de Mata Atlântica**. 2017.

SCHROEDER, W.; MORISETTE, J.T.; CSISZAR, I.; GIGLIO, L.; MORTON, D.; JUSTICE, C.O. Characterizing vegetation fire dynamics in Brazil through multisatellite data: Common trends and practical issues. **Earth Interactions**, v. 9, p.1-26, 2005.

SETZER, Alberto; MORELLI, Fabiano; SOUZA, Jean Carlos. O Banco de Dados de Queimadas do INPE. **Biodiversidade Brasileira-BioBrasil**, n. 1, p. 239-239, 2019.

SILVA, Francisco Alves. **Avaliação temporal da variação da cobertura vegetal pela ação do fogo no município de Lábrea (AM)**. 2018.

SILVA JUNIOR, Carlos Antonio da et al. Fires drive long-term environmental degradation in the Amazon Basin. **Remote Sensing**, v. 14, n. 2, p. 338, 2022.

SILVA, S. S.; Fearnside, P. M.; Graça, P. M. L. de A.; et al. Dynamics of forest fires in the southwestern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 424, p. 312–322. doi: 10.1016/j.foreco.2018.04.041, 2018.

SILVA, Viviane Vidal da; SILVA, Ricardo Gilson da Costa. Amazônia, Fronteira e Áreas Protegidas: dialética da expansão econômica e proteção da natureza. **Ambiente & Sociedade**, v. 25, 2022.

SINGH, Minerva; ZHU, Xiao xiang. **Analysis of how the spatial and temporal patterns of fire and their bioclimatic and anthropogenic drivers vary across the Amazon rainforest in El Niño and non-El Niño years**. PeerJ, v. 9, p. e12029, 2021.

SOUZA, A. et al. Impacto de fatores meteorológicos sobre as concentrações de ozônio modelados por análise de séries temporais e métodos estatísticos multivariados. **HOLOS**, v. 5, p. 2-16, 2017.

SOUZA, N., SILVA, E., TEIXEIRA, M. D., Leite, L. R., REIS, A., SOUZA, L., ... & REZENDE, T. Aplicação do Estimador de densidade Kernel em unidades de conservação na bacia do Rio São Francisco para análise de focos de desmatamento e focos de calor. **Anais. XVI simpósio brasileiro de sensoriamento remoto**, Foz do Iguaçu, PR, 2013.

SUDAM. Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia. Disponível em <https://www.gov.br/sudam/pt-br> Acesso em: 20/06/2023

WHITE, Benjamin Leonardo Alves. Quantitative differences in detection of fire pixels using Aqua/MODIS and NPP-Suomi/VIIIRS satellites. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 12, n. 6, p. 379-390, 2022.

WORLDCLIM. Disponível em: <<https://www.worldclim.org/data/bioclim.html>>. Acesso em: 20/06/2023.

XU, Xiyan et al. Climate regime shift and forest loss amplify fire in Amazonian forests. **Global Change Biology**, v. 26, n. 10, p. 5874-5885, 2020.

YOKELSON, Robert J. et al. The Tropical Forest and Fire Emissions Experiment: overview and airborne fire emission factor measurements. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 7, n. 19, p. 5175-5196, 2007.