

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

JOSÉ HENRIQUE DA SILVA BRAZ

**Uma análise dos dados de queimada do
INPE no Brasil (preliminar)**

Monografia apresentada como requisito parcial
para a obtenção do grau de Bacharel em Ciência
da Computação

Orientador: Prof. Dr. Lucas M. Schnorr

Porto Alegre
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos André Bulhões

Vice-Reitora: Prof^a. Patricia Pranke

Pró-Reitora de Graduação: Prof^a. Cíntia Inês Boll

Diretora do Instituto de Informática: Prof^a. Carla Maria Dal Sasso Freitas

Coordenador do Curso de Ciência de Computação: Prof. Marcelo Walter

Bibliotecário-chefe do Instituto de Informática: Alexsander Borges Ribeiro

*“If I have seen farther than others,
it is because I stood on the shoulders of giants.”*

— SIR ISAAC NEWTON

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao L^AT_EX por não ter vírus de macro...

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	8
RESUMO	9
ABSTRACT	10
1 INTRODUÇÃO	11
2 CONCEITOS BÁSICOS E TRABALHOS RELACIONADOS	13
2.1 O monitoramento das queimadas no Brasil	13
2.2 Os Satélites e Sensores	14
2.3 Uma visão geral dos dados	19
2.4 Detecção de focos de queimadas e área queimada	22
2.5 Trabalhos Relacionados.....	28
3 METODOLOGIA	30
3.1 Visão geral da metodologia	30
3.2 Mapeamento dos focos para áreas.....	32
3.3 Separação e avaliação de quadrantes.....	33
3.4 Cálculo da área queimada.....	35
4 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO	37
4.1 Coleta dos dados.....	37
4.2 Implementação do método	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
5.1 Aplicações do método	42
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	Application Programming Interface (Interface de Programação de Aplicação)
CSV	Comma Separated Values (valores separados por vírgulas).
GMT	Greenwich Mean Time
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
URL	Uniform Resource Locator (Localizador Uniforme de Recursos)
NOAA	National Oceanic and Atmosphere Administration
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Emissões de gases do efeito estufa per capita de 1990 até 2020 (tCO ₂ e/capita).	11
Figura 2.1	Órbita dos satélites no dia 10 de agosto de 2022.	16
Figura 2.2	Deteções por satélite, sensor, bioma e região durante toda a série histórica	20
Figura 2.3	Amostragem por tempo de cada satélite.	21
Figura 2.4		22
Figura 2.5	Variação da reflectância (%) em relação à frequência da luz eletromagnética emitida por uma floresta. A cor verde representa a reflectância de uma vegetação não queimada, a cor vermelha representa a reflectância do fogo ativo na parte inferior da floresta (no solo), a cor preta representa um incêndio na copa das árvores e a cor cinza representa a reflectância de uma vegetação queimada (carvão).	25
Figura 3.1	Diagrama do método. A entrada principal são os dados de focos de queimadas e a saída principal é a estimativa de áreas queimadas. Abaixo os resultados produzidos com a aplicação em um determinado local para cada etapa.	30
Figura 3.2	Comparação entre pontos e áreas dos focos detectados pelo satélite Suomi NPP.	32
Figura 3.3	Separação entre quadrantes.	33
Figura 3.4	Funções embutidas para cálculo de área.	36
Figura 3.5	Exemplo da aplicação das funções embutidas.	36
Figura 4.1	Cores escolhidas para cada satélite.	40
Figura 4.2	Diferença da avaliação para diferentes tamanhos de quadrantes.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Significado de cada coluna dos dados de queimada do INPE.	15
Tabela 2.2	Características dos satélites usados pelo INPE.	17
Tabela 2.3	Nível de maturidade dos produtos	23
Tabela 2.4	Nível de processamento dos dados dos produtos	23
Tabela 2.5	Versões resumidas do Collection para o sensor MODIS	24
Tabela 2.6	Resumo dos produtos de área queimada	27
Tabela 2.7	Comparação entre os trabalhos apresentados	29

RESUMO

Este documento é um exemplo de como formatar documentos para o Instituto de Informática da UFRGS usando as classes \LaTeX disponibilizadas pelo UTUG. Ao mesmo tempo, pode servir de consulta para comandos mais genéricos. *O texto do resumo não deve conter mais do que 500 palavras.*

Palavras-chave: Formatação eletrônica de documentos. \LaTeX . ABNT. UFRGS.

Using L^AT_EX to Prepare Documents at II/UFRGS

ABSTRACT

This document is an example on how to prepare documents at II/UFRGS using the L^AT_EX classes provided by the UTUG. At the same time, it may serve as a guide for general-purpose commands. *The text in the abstract should not contain more than 500 words.*

Keywords: Electronic document preparation. L^AT_EX. ABNT. UFRGS.

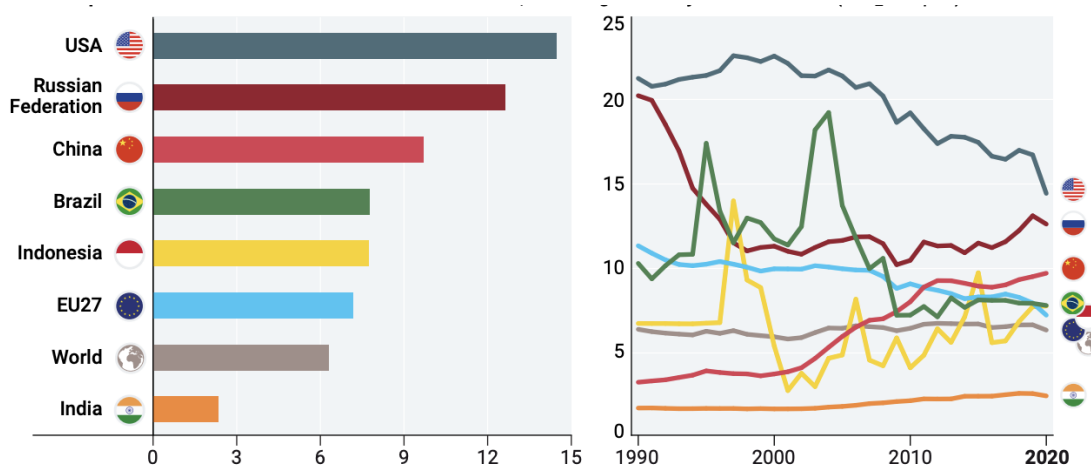
1 INTRODUÇÃO

O fogo é uma tecnologia que está presente há milênios no território que hoje é o Brasil, desde queimadas controladas pelo povo indígena Kayapó no cerrado para plantio ou caça, até incêndios iniciados por combustão espontânea em períodos de seca no sul da Amazônia. O uso do fogo pelos indígenas era controlado, levando em conta o clima atual e a vegetação a ser queimada, e restrito apenas a um período do ano, com o intuito de reduzir pragas e ajudar nas plantações (LEONEL, 2000). [P0. O que é uma queimada/fogo]

Hoje as queimadas que mais chamam atenção estão diretamente ligadas ao processo de desmatamento e manejo de áreas agrícolas para o cultivo da monocultura de soja. O fogo também é a prática mais barata e rápida para limpar áreas inteiras para a pecuária bovina. Commodities agrícolas e carne bovina movem a economia do Brasil, que é o maior exportador desses produtos, e aumentam a pressão para o desmatamento de novas áreas na Amazônia (FUCHS, 2020). [P1. As queimadas hoje]

O Brasil ocupa a quarta posição no ranking de nações que mais emitem gases de efeito estufa por habitantes, segundo dados da United Nations Environment Programme (UNEP) de 2022. De acordo com o estudo, o valor absoluto se manteve estável desde 2010, e atingiu seu pico por volta dos anos de 2003 a 2004. Assim como a Indonésia, o que melhor explica a alta posição do Brasil neste ranking são as queimadas e o desmatamento da vegetação nativa. Olhando para os municípios do país, dos dez que mais poluem, oito deles estão localizados no bioma da amazônia e não possuem atividades industriais que justificariam esse valor. [P2. queimadas e efeito estufa no Brasil]

Figura 1.1 – Emissões de gases do efeito estufa per capita de 1990 até 2020 (tCO₂e/capita).



Fonte: Emissions Gap Report 2022: The Closing Window

Este trabalho se dedica a estudar e apresentar de forma concisa os dados de focos de queimadas disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O principal objetivo é tornar fácil o entendimento desses dados gerados a partir de imagens de satélites, sem a necessidade de um conhecimento prévio das técnicas de ciência de dados e sensoriamento remoto. O escopo de tempo das análises é limitado ao início de 1998, ano que iniciou a base aberta de queimadas, até o final de 2022. [P3. O que é o trabalho em si]

Os dados analisados neste trabalho foram obtidos a partir do DBQueimadas, Banco de Dados de Queimadas <www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas>, que é um sistema desenvolvido pelo INPE e acessível de forma aberta por meio da web. Conta com mais de 300 milhões de pontos coletados desde o ano de 1998, provenientes de vários satélites (SETZER; MORELLI; SOUZA, 2019). Ao disponibilizar os dados das queimadas o instituto possibilita que a sociedade retribua com pesquisas e fomenta novas abordagens ao problema das queimadas no Brasil, como é o caso deste trabalho. [P4. Fonte dos dados usados]

... apontaram que a detecção de áreas queimadas pode se beneficiar da fusão de observações de incêndios ativos de vários sensores. (GIGLIO et al., 2010) mas incêndios ativos podem ficar omissos (GIGLIO et al., 2009)

Durante o decorrer do documento são apresentadas diversas figuras, a maioria de construção do próprio autor, a fim de instigar a intuição do leitor para o tópico que está sendo abordado. De início, será abordado questões mais teóricas envolvendo características dos satélites, suas produções de imagens e como são usadas para detectar um foco ativo de queimada. Após isso, [P5. Estrutura do documento]

2 CONCEITOS BÁSICOS E TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo, serão apresentados conceitos importantes para a compreensão do trabalho. Primeiramente, serão formalizadas definições relacionadas às queimadas e à forma como são monitoradas no Brasil. Em seguida, será realizada uma sumarização dos principais satélites utilizados pelo INPE e suas características. Em seguida, será abordado como as imagens geradas pelos satélites são utilizadas para a detecção de focos ativos. Por fim, apresentaremos uma análise dos dados para demonstrar uma visão geral das principais tendências e gráficos.

2.1 O monitoramento das queimadas no Brasil

Um foco de queima, também conhecido como "Fire Pixel", é a detecção de fogo na vegetação por uma imagem de satélite. A área de abrangência dessa detecção é do tamanho de um pixel na imagem. Um incêndio pode durar dias e queimar uma grande extensão de terra, o que provavelmente resultará na detecção de vários focos de queima. O número de focos de queima está diretamente relacionado à extensão total queimada e pode ser utilizado para comparações e análises. A área queimada, por outro lado, representa o resultado deixado pelo incêndio e também pode ser estimada a partir de imagens de satélites, usando índices de vegetação de diferentes bandas do sensor dos satélites.

É importante destacar que o foco de queima por si só não representa de forma precisa o que está acontecendo na região, mas é um indicador valioso da intensidade e extensão do fogo. Poucos focos ou uma área queimada pequena não necessariamente refletem a intensidade da degradação da vegetação e o impacto ambiental. Áreas de floresta densa, mesmo que pequenas, podem ser gravemente afetadas, resultando em perdas significativas de fauna e flora, incluindo espécies exóticas e em risco de extinção.

É com o intuito de monitorar e proteger o meio ambiente do país que o INPE desenvolve o programa de Monitoramento de Queimadas e Incêndios Florestais (<<https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal>>). O programa é um conjunto de ferramentas abertas, muitas delas acessíveis via Web, desenvolvidas pelo time de tecnologia do INPE. É possível obter e visualizar dados sobre os focos de queimadas, risco de fogo, área queimada, focos em áreas de preservação e propriedades rurais, entre outras.

O programa também conta com o Banco de Dados de Queimadas (DBQueimadas), um site que possibilita gerar mapas, tabelas, gráficos e exportar os dados sobre as quei-

madras no Brasil aplicando diferentes filtros (SETZER; MORELLI; SOUZA, 2019). O DBQueimadas é um excelente caso de como os dados abertos podem ajudar a sociedade. Além do DBQueimadas, o INPE também disponibiliza para visualização e download, por meio da Divisão de Geração de Imagens (DGI) <www.dgi.inpe.br/catalogo/>, algumas imagens inteiras geradas pelos satélites que o próprio DGI captura e processa.

Para obter as imagens brutas dos satélites são necessárias antenas especiais que ficam em centros de recepção de dados. Com esse propósito, a DGI possui duas Estações de Recepção e Gravação (ERG) - a primeira em Cachoeira Paulista (SP) e uma mais recente em Cuiabá (MT). Na estação de SP, é feito o processamento de mais de 200 imagens de diversos satélites todos os dias, extraíndo os dados de focos ativos de queimadas que alimentam o DBQueimadas (Divisão de Geração de Imagens, 2023).

É em posse dessas imagens brutas que o INPE aplica algoritmos de detecção de focos de queimadas, abordado na Sessão 2.4. No caso da detecção ser positiva, a posição exata (latitude e longitude) e a hora que a imagem foi gerada são adicionadas aos dados como uma nova linha e disponibilizados pelo DBQueimadas. O INPE ainda coloca junto com as coordenadas da detecção mais alguns dados como risco de fogo, poder do fogo, precipitação e dados referentes a região do foco. A lista completa das colunas pode ser vista na Tabela 2.1 (INPE, 2023b).

2.2 Os Satélites e Sensores

O INPE processa atualmente dados de diversos satélites, cada um com características distintas. Esses satélites abrangem uma ampla gama de órbitas e altitudes, desde satélites geoestacionários, como o GOES-12, localizado a 29.400 km de distância da superfície (SETZER; YOSHIDA, 2004), até satélites em órbitas polares, que ficam entre 700 e 900 km de altura. Cada um desses satélites é equipado com diferentes sensores que são utilizados para diversos propósitos, como observação da vegetação terrestre, nuvens, oceanos e monitoramento atmosférico.

Cada satélite pode estar equipado com um sensor imageador que captura imagens com características distintas. Esses sensores são capazes de captar não apenas a luz visível, no intervalo de 400 nm a 700 nm, mas também o infravermelho, de 780 nm a 1 mm. As medições realizadas pelos sensores são divididas em canais, que diferem em termos de resolução espacial - a escala geográfica representada por cada pixel da imagem - e resolução espectral, ou seja, o intervalo de comprimento de onda abrangido. Geral-

Tabela 2.1 – Significado de cada coluna dos dados de queimada do INPE.

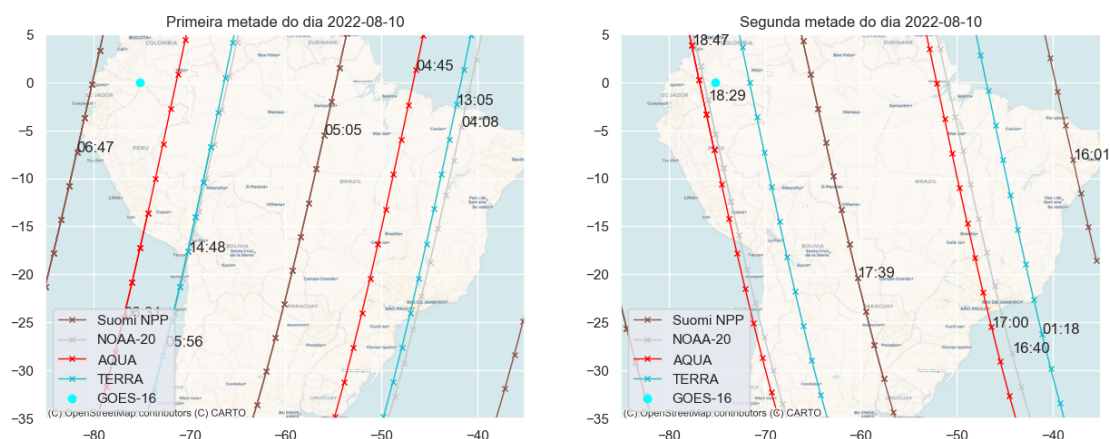
Atributo	Tipo	Descrição
Id	string	Identificador único registrado no banco
Latitude	double	Graus decimais da latitude do centro do pixel de fogo ativo (valores de 90.0000 até -90.0000)
Longitude	double	Graus decimais da longitude do centro do pixel de fogo ativo (valores de 180.0000 até -180.0000)
DataHora	string	Data a hora da passagem do satélite no fuso horário de Greenwich (GMT)
Município	string	Nome do município, de acordo com os dados do IBGE 2000
Estado	string	Nome do estado
País	string	Nome do país
Bioma	string	Nome do bioma brasileiro, de acordo com dados do IBGE 2004 (para outros países o campo fica vazio)
Precipitação	double	Valor a precipitação do dia até o horário da medida (-999 para valores inválidos)
DiasSCh	integer	Dias sem chuva até a data da medida (-999 para valores inválidos)
RiscoFog	double	Valor do risco de fogo previsto naquele dia (-999 para valores inválidos)
FRP	double	Fire Radiative Power, MW (megawatts)

Fonte: O Autor com base em INPE (2023b)

mente, o primeiro canal é dedicado à luz visível, abrangendo o espectro do laranja ao vermelho e possui a maior resolução espacial possível para o sensor. Os demais canais utilizam diferentes intervalos de comprimento de onda do infravermelho e da luz visível, frequentemente com incremento na resolução espacial.

Os satélites também podem ser classificados de acordo com o tipo de órbita, que pode ser polar ou geoestacionária. Os satélites polares percorrem toda a terra, com uma altitude baixa e alta velocidade, passando várias vezes pelos polos norte e sul em um único dia. Já os satélites geoestacionários ajustam sua órbita para sempre parecerem estacionários em relação a um ponto fixo na Terra. Esses satélites ficam em altitudes mais altas devido à sua velocidade mais baixa, que é igual à rotação da Terra. A Figura 2.1, gerada a partir de dados do site Celestrak (<<https://celestrak.org/>>), mostra a passagem de alguns satélites polares no Brasil no dia 10 de agosto de 2022. Também é possível ver o satélite geoestacionário GOES-16, localizado ao norte do Peru, representado com um ponto no gráfico.

Figura 2.1 – Órbita dos satélites no dia 10 de agosto de 2022.



Fonte: O Autor

A Tabela 2.2 contém um resumo dos satélites utilizados pelo INPE desde o início da série histórica até o final de 2022 (Embrapa Territorial, 2023). Atualmente, os satélites que estão em pleno funcionamento são: NOAA-20, NOAA-19, NOAA-18, GOES-16, Suomi NPP, AQUA, TERRA, MSG-03, METOP-B e METOP-C. Os demais satélites, como NOAA-17, NOAA-16, NOAA-15, TRMM, NOAA-14, NOAA-12, GOES-13, MSG-02, GOES-12, GOES-10 e GOES-08, deixaram de operar em diferentes momentos devido a problemas técnicos ou ao fim de sua vida útil e componentes.

Os satélites TERRA e AQUA, ambos com o sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), foram lançados em 1999 e 2002 respectivamente. São americanos e foram desenvolvidos em parceria com o Japão, Canadá e Brasil. O sensor MODIS possui 36 canais e resolução espectral que varia de 250m a 1km em diferentes espectros do infravermelho e luz visível. É especialmente capaz de detectar mudanças no uso e cobertura da terra bem como queimadas e atividades vulcânicas.

Os satélites da série NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) são operados pela agência americana de mesmo nome. Embora tenha havido vários satélites NOAA ao longo do tempo, atualmente estão em operação o NOAA-20, NOAA-19 e NOAA-18. Esses satélites desempenham um papel fundamental no fornecimento de dados para a previsão do tempo e o monitoramento da vegetação.

Além dos satélites NOAA, em 2011, a NOAA em parceria com a NASA lançou o satélite Suomi NPP (Suomi National Polar-orbiting Partnership). O Suomi NPP tem como objetivo principal obter observações ambientais e meteorológicas avançadas da Terra. É equipado com o sensor VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), que também

Tabela 2.2 – Características dos satélites usados pelo INPE.

Nome	Sensor	Resolução esp.	Órbita	Lançamento	Passagem
METOP-C	AVHRR-3	1100m	Polar	2018	21h
NOAA-20	VIIRS	500m	Polar	2017	2h / 14h
METOP-B	AVHRR-3	1100m	Polar	2012	21h
Suomi NPP	VIIRS	500m	Polar	2011	2h / 14h
NOAA-19	AVHRR-3	1100m	Polar	2009	2h / 14h
NOAA-18	AVHRR-3	1100m	Polar	2005	Variadas
AQUA	MODIS	1000m	Polar	2002	2h / 14h
NOAA-17	AVHRR-3	1100m	Polar	2002	21h
NOAA-16	AVHRR-3	1100m	Polar	2000	Variadas
TERRA	MODIS	1000m	Polar	1999	11h / 23h
NOAA-15	AVHRR-3	1100m	Polar	1998	5h / 17h
TRMM	VIRS	2000m	Polar	1997	Variadas
ERS-2	ATSR-2	1000m	Polar	1995	Variadas
NOAA-14	AVHRR	1100m	Polar	1994	21h
NOAA-12	AVHRR	1100m	Polar	1991	2h / 15h
ERS-1	ATSR-1	1000m	Polar	1991	Variadas
GOES-16	ABI	2000m	Geoest.	2016	Não se aplica
MSG-03	SEVIRI	3000m	Geoest.	2012	Não se aplica
GOES-13	GOES I-M	4000m	Geoest.	2006	Não se aplica
MSG-02	SEVIRI	3000m	Geoest.	2005	Não se aplica
GOES-12	GOES I-M	4000m	Geoest.	2001	Não se aplica
GOES-10	GOES I-M	4000m	Geoest.	1997	Não se aplica
GOES-08	GOES I-M	4000m	Geoest.	1994	Não se aplica

Fonte: O Autor com base em Embrapa Territorial (2023)

está presente no NOAA-20. Esses dois satélites, Suomi NPP e NOAA-20, são os satélites com mais alta resolução espacial entre todos os processados pelo INPE.

O conjunto de satélites GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) é operado pela NASA e controlado também pelo NOAA. As primeiras versões desses satélites geoestacionários foram equipadas com o sensor GOES I-M (Imager Radiometer e Vertical Sounder) de resolução espacial equivalente a 4km. A partir do GOES-16 o sensor foi substituído pelo ABI (Advanced Baseline Imager), capaz de produzir imagens com resolução 4 vezes melhores. Esse conjunto de satélites foi e ainda é muito usado nas previsões meteorológicas nos países do continente americano.

O INPE processa as imagens dos satélites da série METOP (Meteorological Operational Satellite), incluindo o METOP-B e o METOP-C, bem como os satélites da série MSG (Meteosat Second Generation), como o MSG-02 (Meteosat-9) e o MSG-03 (Meteosat-10). Ambas missões projetadas em parceria com a ESA (Agência Espacial Europeia) e a EUMETSAT (Organização Europeia para a Exploração de Satélites Meteorológicos). Esses satélites têm como objetivo a previsão do tempo, o monitoramento climático e o acompanhamento de desastres naturais. O METOP-C é o último satélite planejado para a série METOP, completando assim o conjunto de satélites METOP-A, METOP-B e METOP-C.

O instituto também processou dados dos satélites ERS-1 e ERS-2, equipados com o sensor ATRS (Along Track Scanning Radiometer) da Agência Espacial Europeia (ESA) (Embrapa Territorial, 2023). Esses satélites, de órbita polar, são especializados em medir com precisão a temperatura da terra e dos oceanos. Os dados coletados por esses satélites são utilizados por cientistas para detectar mudanças climáticas e vegetação, incluindo eventos como queimadas, em todo o planeta. O ATRS possui duas versões, sendo que o primeiro (ATSR-1) possui 4 canais e o segundo (ATSR-2) foi aprimorado com um canal adicional para capturar a luz visível, possibilitando o monitoramento da vegetação.

Também estão presentes nos dados, em menor escala, os focos de queimadas obtidos pelo satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission). O TRMM foi uma missão conjunta entre a NASA e a JAXA (Agência Espacial Japonesa), que teve início em 1997 e oficialmente encerrou em 2015. O principal objetivo dessa missão era estudar a distribuição de chuvas e tempestades, bem como suas influências no clima global.

Para estabelecer uma série temporal consistente e permitir a análise de tendências ao longo de vários anos dos focos de queimadas detectados em diferentes regiões, o INPE definiu um satélite de referência. Esse satélite de referência é escolhido com base em

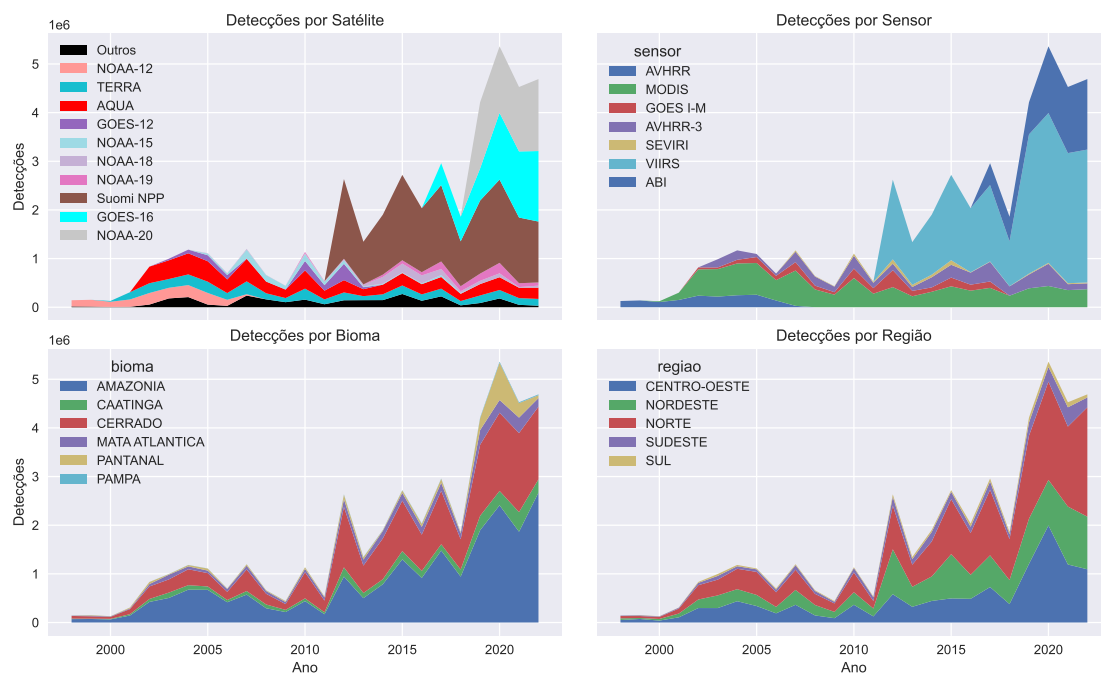
critérios específicos. É importante que sua órbita cubra satisfatoriamente a área do país, sem distorcer os dados de forma significativa. Além disso, é desejável que os sensores do satélite tenham resoluções adequadas, ou seja, não muito baixas, para garantir uma análise precisa dos focos de queimadas.

No período de 01 de junho de 1998 a 03 de julho de 2002, o satélite de referência utilizado foi o NOAA-12, com passagem no final da tarde. Após esse período, passou-se a utilizar o satélite AQUA, com passagem à tarde (identificado nos dados como AQUA_M-T). O AQUA tem operado além da data prevista de encerramento e provavelmente deve ser descontinuado em breve. Quando isso ocorrer, a previsão é que o satélite Suomi NPP deve ser o novo satélite de referência (INPE, 2023b). Sempre que há uma mudança de satélite de referência, a série histórica de quantidade de focos de queimada precisa ser ajustada devido a diferença entre os satélites.

2.3 Uma visão geral dos dados

Nesta sessão, será realizada uma análise inicial dos dados disponíveis sobre focos de queimada, com o objetivo de extrair algumas informações relevantes. É importante, no entanto, ter cuidado na escolha dos satélites a serem utilizados na análise. Para algumas análises, caso sejam usados todos os satélites disponíveis, pode ocorrer a contagem de um mesmo foco várias vezes ou, ainda, a contagem do mesmo foco em passagens diurnas e noturnas de um mesmo satélite polar. Para solucionar esse problema, será utilizado o satélite AQUA com passagem à tarde (AQUA_M-T), que é o satélite de referência do INPE atualmente. Dessa forma, é possível evitar a contagem duplicada de focos de queimada e garantir a precisão das informações analisadas.

Figura 2.2 – Detecções por satélite, sensor, bioma e região durante toda a série histórica



Fonte: O Autor

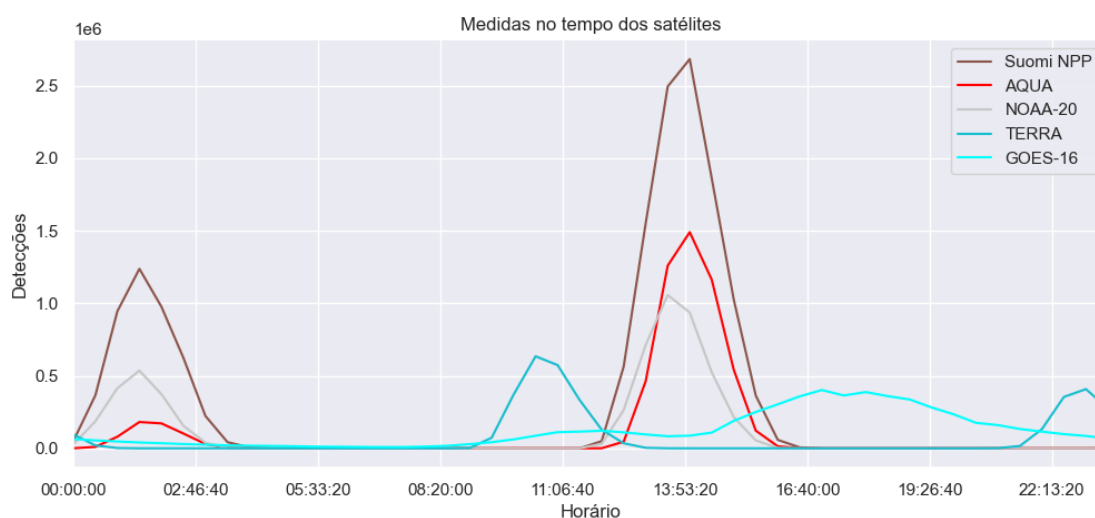
A análise começa, na Figura 2.2, com uma visão preliminar sobre as características dos focos detectados durante toda a série histórica. Aqui é importante destacar que vários focos podem representar uma única queimada e também não tem relação necessariamente com a área queimada. Nota-se que a série começa basicamente com os dados do satélite NOAA-12, que era o satélite de referência até 2002, e teve dados até 2007, ano que foi desativado. TERRA e AQUA foram os únicos satélites presentes no início e que até hoje tem relevância nos dados. A partir de 2012, com a entrada do satélite Suomi NPP, os dados mais que duplicaram devido a capacidade do sensor VIIRS a bordo deste satélite e depois, em 2019, junto ao NOAA-20 também. A partir de 2017 o satélite GOES-16 entra em ação e, mesmo sendo geoestacionário, passou a ter relevância.

Quanto as detecções por bioma, nota-se que no decorrer dos anos a proporção entre os focos em cada bioma se manteve basicamente constante, com exceção do período de 2019 a 2022. Nesse período, o bioma Pantanal quebrou a tendência de ter poucos focos detectados, apresentando um aumento de 600% e justificado por um período de seca prolongado (MIRANDA; MARTINHO; CARVALHO, 2021). Nesse mesmo período, também notou-se um aumento nas detecções, ainda que bem menor, no bioma da Mata Atlântica, bioma considerado o mais degradado do Brasil.

Saber em quais momentos os satélites passam também é importante para a análise.

Os satélites polares passam duas vezes por dia no Brasil, variando o local exato da passagem de acordo com as características de sua órbita. Pela Figura 2.3 é possível observar esse comportamento empiricamente, em que as 5 primeiras linhas, que representam dados gerados por satélites polares, apresentam dois picos durante um período de 24 horas. Já para o caso dos geoestacionários (GOES-16), que ficam fixos em relação a uma posição na Terra, não se observou o mesmo padrão.

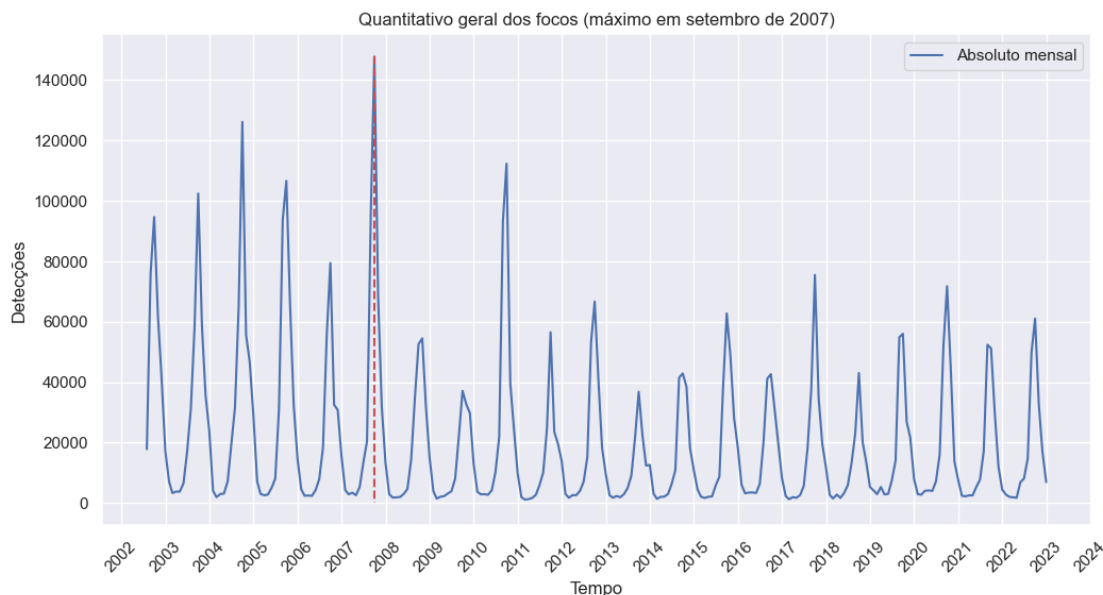
Figura 2.3 – Amostragem por tempo de cada satélite.



Fonte: O Autor

A partir de uma análise quantitativa dos dados com relação ao tempo de cada medida, exposto na Figura 2.4, podemos identificar uma grande sazonalidade, sempre tendo picos entre os meses de agosto e setembro. Desde o início da série, o mês que mais teve focos detectados foi setembro de 2007.

Figura 2.4



Fonte: O Autor

P1. Fazer análise preliminar dos dados gerando alguns gráficos

P2. Gráficos geral do brasil com os focos de queimadas totais (REY; ARRIBAS-BEL; WOLF, 2020)

2.4 Detecção de focos de queimadas e área queimada

Nesta sessão será abordada de forma mais detalhada como os dados brutos dos sensores dos satélites são usado de fato para encontrar focos ativos de queimadas e como o cálculo da área queimada é realizado atualmente. O texto começa com uma explicação de como funciona o processamento dos dados brutos e depois apresenta o método mais consolidado atualmente de detecção de focos ativos. Em seguida, são apresentados três métodos diferentes para o calculo da área queimada, sendo um mantido pelo INPE, outro pela NASA e outro pela ESA.

Os dados brutos dos sensores dos satélites são processados usando algoritmos específicos e produzem resultados chamados de "produtos". Nesse processo, os algoritmos corrigem distorções, eliminam ruídos e convertem os valores para dados que podem ser representados visualmente. Os produtos podem ter várias finalidades, como detecção de níveis de CO_2 , radiância do solo, anomalias térmicas, entre outros, além de servirem como entrada para outros produtos. Os produtos podem ser classificados pelo seu nível

de maturidade (Tabela 2.3) e pelo nível de processamento dos dados (Tabela 2.4):

Tabela 2.3 – Nível de maturidade dos produtos

Nível	Descrição
Beta	Apenas deve ser usado para testes
Provisório	O produto está em melhoria e segue sendo validado, não há garantias que qualidade
Validado	O produto tem alta qualidade e pode ser usado para estudos rigorosos, como de mudanças climáticas. É subdividido em 4 estágios de validação. Nessa fase, o produto ainda pode seguir melhorando para atingir estágios mais altos de validação.

Fonte: O Autor com base em (NASA, 2023)

Tabela 2.4 – Nível de processamento dos dados dos produtos

Nível	Descrição
Nível 0	É o mais próximo dos dados brutos, com tratamento apenas de erros gerados pela comunicação dos dados, como dados duplicados
Nível 1	São dados georeferenciados com correções geométricas em relação a superfície da terra. Contém dados como radiância e reflectâncias. São subdivididos entre 1A, 1B e 1C
Nível 2	São dados referentes a geofísica da terra, como características da superfície terrestre, dados atmosféricos, níveis de poluentes, entre outros. São subdivididos entre 2A e 2B
Nível 3	São dados de nível 2 organizados no espaço e agrupados em períodos de tempo fixo (diário, mensal, anual), permitindo uma análise em escala global.
Nível 4	Envolve o uso dos dados em modelos ou uso deles em conjuntos com outros dados ou produtos, produzindo estimativas mais aprimoradas

Fonte: O Autor com base em (EARTHDATA, 2023)

A evolução dos produtos gerados a partir do sensor MODIS é contínua à medida que a série temporal se expande. Isso resulta em diferentes versões do conjunto de produtos, denominado "Collection" e seguido por um número que define a versão. Por exemplo, a versão mais recente atualmente é a Collection 6.1, que também pode ser referida de forma simplificada como C6.1. Durante o desenvolvimento de uma nova versão, a versão anterior continua disponível enquanto os cálculos e processamentos são atualizados para os diferentes produtos. Isso permite que os usuários tenham acesso contínuo aos dados e resultados até que a nova versão esteja completa. A Tabela 2.5 apresenta um resumo das principais mudanças que ocorreram de uma versão para outra do Collection, começando pela versão que surgiu no mesmo ano do lançamento do satélite AQUA.

Tabela 2.5 – Versões resumidas do Collection para o sensor MODIS

Versão	Criação	Fim	Descrição
6.1	2017	Atual	Corrigiu problemas nos dados de entrada do Nível-1B (L1B) - com algumas novas melhorias nos produtos do Nível-2 (L2) e Nível-3 (L3) adicionadas.
6	2013	2018	A Coleção 6 incluiu muitas novas atualizações científicas e melhorias.
5.1	2008	2016	Atualização fundamental para o Produto L2 de Aerossol (04_L2) e o Produto L2 de Nuvem (06_L2) - juntamente com todos os produtos L3 para incorporar as atualizações do L2.
5	2005	2016	Primeira grande coleção científica, que foi amplamente distribuída.
4	2002	2006	Primeira versão que atingiu 3 estágios de validação

Fonte: Traduzido e modificado a partir de (PRODUCTS, 2023)

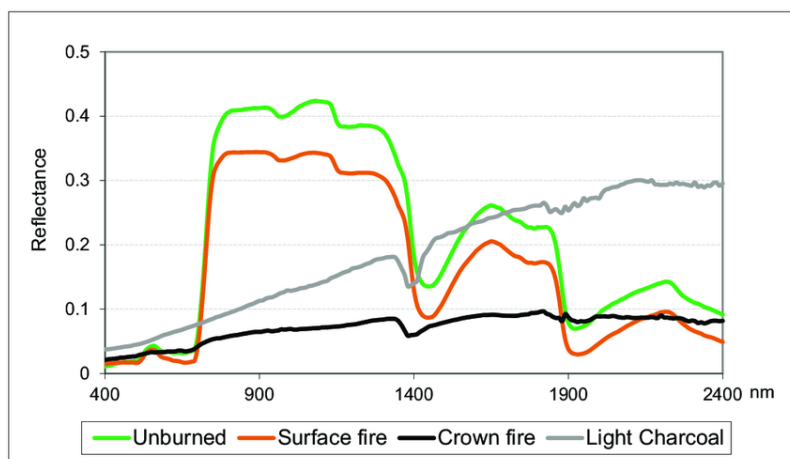
Produtos de focos ativos

Os algoritmos que geram produtos de focos ativos, geralmente usam diferentes canais dos sensores dos satélites, entre a luz visível e o infravermelho, e podem ter comportamentos distintos dependendo se a imagem foi gerada à noite ou de dia. Podem também usar limiares dinâmicos, de acordo com a região do planeta, que são calculados, com base em uma espécie de média das temperaturas nas regiões próximas ao longo dos dias. Além disso, é comum a aplicação de máscaras para eliminar regiões submersas, costeiras, deserticas e que estavam nubladas na hora da passagem.

Para simplificar o trabalho, será abordado apenas o método empregado para a detecção de focos ativos oficial da NASA, a partir do sensor MODIS (GIGLIO; SCHROEDER; JUSTICE, 2016), que faz parte de Collection 6.1. O método recebe como entrada os produtos Nível 1B de radiância dos dois satélites (MOD021KM/MYD021KM) e os produtos Nível 1A (MOD03/MYD03) que identificam regiões de água, regiões costeiras e de terra. O resultado são dois produtos, MOD14 para o satélite Terra e MYD14 para o satélite Aqua, de Nível 2 e de resolução espacial 1Km.

O processamento começa identificando e eliminando as regiões costeiras dos dados de reflectância, a fim de evitar confundir áreas terrestres mais quentes com áreas de água. Em seguida, ocorre a filtragem das regiões com cobertura de nuvens, utilizando limites atualizados, com cuidado para não excluir regiões de fumaça proveniente de incêndios ativos. As regiões remanescentes passam por um processo de avaliação para determinar potenciais píxels de fogo ativo. Esse processo envolve o teste da reflectância

Figura 2.5 – Variação da reflectância (%) em relação à frequência da luz eletromagnética emitida por uma floresta. A cor verde representa a reflectância de uma vegetação não queimada, a cor vermelha representa a reflectância do fogo ativo na parte inferior da floresta (no solo), a cor preta representa um incêndio na copa das árvores e a cor cinza representa a reflectância de uma vegetação queimada (carvão).



Fonte: Extraído de Chuvieco et al. (2019) com base nos modelos Prospect + Geosail

em relação a limiares dinâmicos, que são constantemente atualizados e ajustados para diferentes regiões do planeta, no caso das áreas terrestres. Para regiões onde não há dados suficientes para calcular os limiares dinâmicos ou para áreas de água, é utilizado um limiar fixo igual ao do Collection 5.

O algoritmo passa então a calcular médias de reflectância em uma grade centrada no pixel potencial de fogo ativo. Com base nessas médias locais, os pixels que atendem aos diversos testes relacionados a essas médias são selecionados. Os pixels que não possuem dados suficientes na vizinhança e não passaram nos testes são rotulados como "sem dado". Em seguida, o algoritmo entra em uma fase de descarte dos pixels preliminarmente classificados como fogo ativo, a fim de reduzir os falsos positivos. Durante essa fase de descarte, os pixels são eliminados se forem identificados reflexos solares maiores do que o aceitável ou se estiverem próximos a regiões costeiras, tanto para pixels na água quanto na terra. Além disso, outros filtros são aplicados exclusivamente para pixels em terra: se eles pertencem a regiões desérticas ou se estão em regiões de clareiras florestais.

O INPE desenvolveu seu próprio algoritmo de detecção de focos de queimadas para o sensor MODIS, o qual produzia dados de maior confiabilidade (INPE, 2023b). No entanto, a partir de 2017, o instituto migrou toda a sua base de dados de focos de queimadas para o Collection 6, marcando o início da chamada Base 2 de queimadas. Anteriormente, quando o Collection 5 estava em uso, eram observados falsos positivos em

clareiras florestais e falsos negativos para grandes queimadas que estavam obscurecidas por fumaça densa (SCHROEDER et al., 2008), o que justificava o desenvolvimento do algoritmo próprio. Como o algoritmo não é mais utilizado e seus resultados foram substituídos na base de dados, ele não será abordado neste trabalho.

Produtos de área queimada

Os algoritmos utilizados para calcular a área queimada utilizam índices que são sensíveis à vegetação queimada, aplicados aos produtos de reflectância. Atualmente, os mais utilizados envolvem uma combinação das bandas do infravermelho próximo (NIR: $0,78 - 1,2\mu m$) e do infravermelho de onda curta (SWIR: $1,2 - 3,0\mu m$), o uso do infravermelho de onda média (MWIR: $3 - 8\mu m$) é mais raro. Estudos indicam que ocorre uma redução na reflectância do NIR após as queimadas e um aumento na reflectância do SWIR, causados pela queima da vegetação e pela secura do ambiente, respectivamente (conforme ilustrado na Figura 2.5) (CHUVIECO et al., 2019).

Para detecção de áreas queimadas o INPE utiliza dois produtos principais: AQ30m e o AQ1km. O produto AQ1km, desenvolvido em parceria com o Laboratório de Aplicações de Satélites Ambientais (LASA), tem resolução espacial de 1Km e dados mensais (INPE, 2023a). O produto AQ30m, por outro lado tem resolução espacial de 30m e dados quinzenais.

O produto AQ1Km está em fase provisória de desenvolvimento (conforme Tabela 2.3). É derivado de dados coletados pelo sensor MODIS, utilizando simultaneamente os satélites Aqua e Terra, além de incorporar informações de focos de queimada do INPE de diferentes satélites (LIBONATI et al., 2015).

Resumidamente, o algoritmo do AQ1km inicia filtrando os dados de reflectância com base em critérios de cobertura de nuvens e posição espacial para minimizar distorções. Em seguida, os dados são agrupados por mês para preencher eventuais lacunas diárias. O algoritmo identifica as áreas denominadas "HotSpots", que correspondem a regiões com atividade de fogo durante o período analisado. Posteriormente, é calculado um índice de vegetação para essas áreas, utilizando dados de reflectância no infravermelho próximo (NIR) e no infravermelho médio (MIR: $3 - 8\mu m$), conforme proposto em Libonati et al. (2011), comparando-o com o mesmo índice do mês anterior. Por fim, são identificadas regiões próximas às áreas classificadas como queimadas no passo anterior, mas que não apresentaram um indicador suficientemente forte. Isso pode indicar que

ocorreu uma queimada parcial ou que a intensidade do fogo foi baixa naquela localidade.

O produto AQ30m

A NASA também mantém um produto específico para o cálculo da área queimada, chamado de MCD64A1, utilizando também os dados dos dois satélites com sensor MODIS (GIGLIO et al., 2018), de resolução espacial de 500m e temporal de um mês. Diferente da versão anterior, a MCD45A1 (C5), esse algoritmo combina as detecções de fogos ativos de 1 km do Collection 6.1 (ver 2.4) com um índice de vegetação sensível a queimadas, construído a partir dos canais 5 e 7 do SWIR do sensor MODIS, capturando a reflectância característica do solo em áreas queimadas. A combinação dos dados de fogos ativos e do índice de vegetação permite que o algoritmo se adapte às diferentes regiões e ecossistemas em todo o mundo. Os artefatos produzidos pelo produto podem ser baixados gratuitamente para cada mês a partir de novembro do ano de 2000 pelo site da Earthdata (<<https://urs.earthdata.nasa.gov>>).

O algoritmo inicia selecionando os dados diários de reflectância válidos, ou seja, dados que não contêm nuvens, fogo ativo, estão localizados em terra e possuem valores dentro do intervalo de 0 a 1. Em seguida, calcula o Índice de Vegetação (IV) para cada célula da grade. Posteriormente, o algoritmo calcula a diferença estatística do IV (S), comparando uma janela de dados de 8 dias antes e 8 dias depois do período avaliado. As regiões que não possuem dados confiáveis dentro dessas janelas de tempo são marcadas como não classificadas. Os dados passam por uma classificação inicial utilizando as estatísticas de S e outras informações de probabilidade de queima. Por fim, o algoritmo analisa as regiões vizinhas às que foram previamente classificadas como queimadas, aplicando uma fórmula probabilística que utiliza dados de focos ativos nessas regiões.

A ESA possui seus próprios produtos de cálculo de queimada também, o mais atual é o FireCCI51 (LIZUNDIA-LOIOLA et al., 2020).

Tabela 2.6 – Resumo dos produtos de área queimada

Nome	Ano	Res. esp.	Res. tem.	Satélites
MOD64A1	2016	500m	mensal	Aqua e Terra
FireCCI51	2018	250m	mensal	Aqua e Terra
AQ1km	2015	1km	mensal	Aqua e Terra
AQ30m	30m	quinzenal	Landsat-8, CBERS-4 e Resourcesat

Fonte: O Autor

2.5 Trabalhos Relacionados

Muitos outros trabalhos antes deste versaram sobre os dados de queimadas e, em menor escala, especificamente sobre o cálculo das áreas queimadas. Nesse capítulo, serão apresentados alguns trabalhos que estão de alguma forma próximos deste e, no final, será discutido o que faz este de certa forma único.

O primeiro estudo refere-se ao trabalho que documentou sobre o produto MCD64A1 (GIGLIO et al., 2018), desenvolvido pela NASA para o cálculo de área queimada usando dados do sensor MODIS, dos satélites AQUA e TERRA. O algoritmo para produção desse produto combina as detecções de fogos ativos de 1 km do Collection 6.1 (ver 2.4) com um índice de vegetação sensível a queimadas, construído a partir dos canais 5 e 7 do infravermelho curto do sensor MODIS. Esse índice captura a reflectância característica do solo em áreas queimadas com uma resolução espacial de 500m. A combinação dos dados de fogos ativos e do índice de vegetação permite que o algoritmo se adapte às diferentes regiões e ecossistemas em todo o mundo. Os artefatos produzidos pelo produto podem ser baixados gratuitamente para cada mês a partir de novembro do ano de 2000 pelo site da Earthdata (<<https://urs.earthdata.nasa.gov>>).

Também desenvolvido pela NASA, o produto MCD45A1 foi lançado primeiramente em 2008 como parte do Collection 5 e, diferente do MCD64A1, não utiliza dados de focos ativos, apenas dados diários de reflectância da superfície. Ele foi descontinuado em favor do MCD64A1, pois era particularmente sensível a interferências de núvens e aerossóis e a períodos de falta de dados.

Um outro trabalho parecido foi o que embasou o produto AQ1km (LIBONATI et al., 2015), desenvolvido pelo INPE. O objetivo do estudo é detectar áreas queimadas mensalmente por meio de sensoriamento remoto utilizando o sensor MODIS (satélites AQUA e TERRA). Para isso, o algoritmo identifica regiões que apresentaram fogo ativo usando diferentes satélites, extraídos da mesma base do INPE, e agrupa os dados a cada um mês. Em seguida, filtra essas regiões com base em um índice de vegetação sensível a queimadas no espectro do infravermelho próximo (índice formalizado em Libonati et al. (2011)), em relação ao mesmo índice do mês anterior. Por fim, identifica regiões próximas às regiões classificadas como área queimada no passo anterior, mas que não apresentaram um indicador forte o suficiente, o que pode ser devido a uma queimada parcial ou baixa intensidade de fogo naquele local.

Comparação e discussão

Tabela 2.7 – Comparação entre os trabalhos apresentados

Nome	Ano	Resolução esp.	Resolução tem.
MOD64A1	2016	1100m	Polar
			2018 21h

Fonte: O Autor

Ambos os estudos utilizaram dados do sensor MODIS para monitorar a reflectância da vegetação a fim de detectar áreas queimadas, embora tenham utilizado índices de vegetação diferentes. Os resultados apresentados pelo produto AQ1km em comparação com o MCD64A1 e MCD45A1 indicam muito mais áreas queimadas, mas apresentam uma menor acurácia geral. Em contraste ao MCD64A1, o produto AQ1km inova e se beneficia dos dados de diferentes satélites para definir as áreas de interesse e calcular o índice de vegetação. No entanto, ainda sofre das mesmas limitações do sensor MODIS, dependendo apenas de dois satélites, AQUA e TERRA, para o resultado final.

— fazer a ponte

No caso do trabalho em questão não são utilizados os dados brutos dos satélites, como os canais de infravermelho usados nos cálculos dos índices de vegetação dos trabalhos anteriores mencionados. Em vez disso, são utilizados apenas os dados de focos ativos provenientes de diferentes satélites processados pelo INPE. Isso simplifica o processo, uma vez que as considerações relacionadas a diferentes regiões e biomas do planeta já foram resolvidas no processamento dos focos ativos. Além disso, essa abordagem apresenta tolerância a falhas, pois se um ou mais satélites falharem, o sistema ainda será capaz de operar com os dados dos satélites restantes.

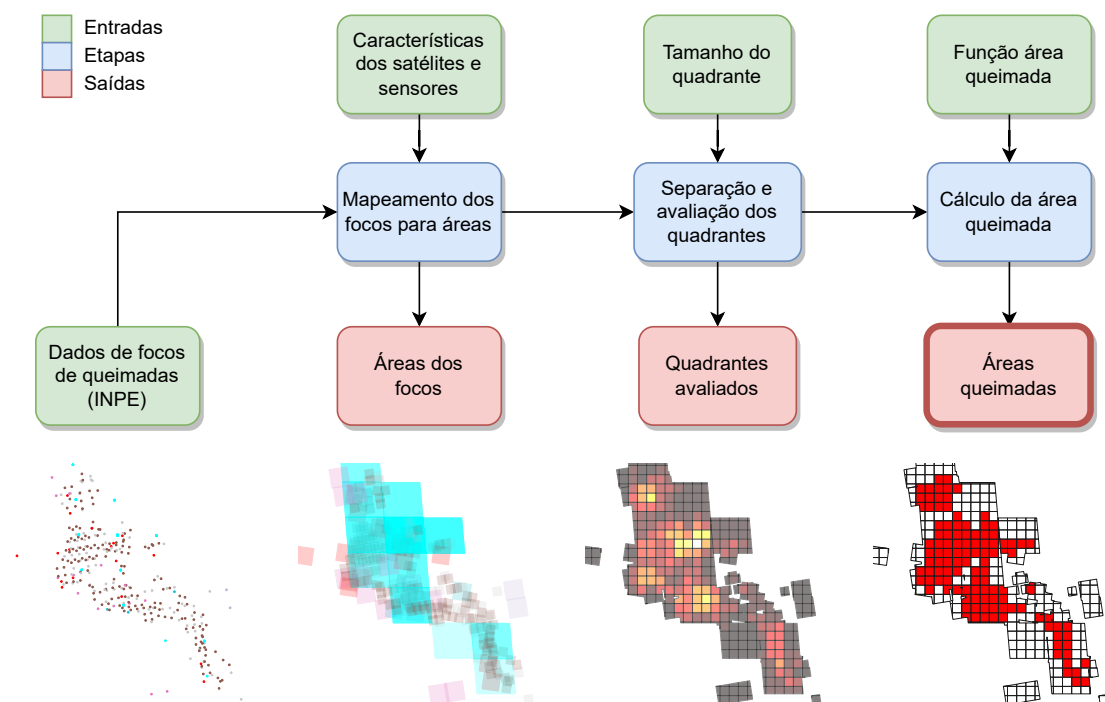
3 METODOLOGIA

Neste capítulo será abordado como método utilizado para calcular as áreas queimadas foi desenvolvido. Começa com uma visão geral do método, depois entra em cada etapa de forma separada e mais detalhada.

3.1 Visão geral da metodologia

A metodologia desenvolvida visa calcular a área de vegetação queimada no Brasil, por meio da análise dos dados de focos de queimadas disponibilizados pelo INPE, juntamente com as características dos diferentes satélites e sensores. A premissa fundamental é que um foco de queimada detectado resulta em uma área queimada. Além disso, considera-se que a quantidade de focos detectados em uma determinada região, em um intervalo de tempo, está diretamente relacionada com a área efetivamente queimada na região.

Figura 3.1 – Diagrama do método. A entrada principal são os dados de focos de queimadas e a saída principal é a estimativa de áreas queimadas. Abaixo os resultados produzidos com a aplicação em um determinado local para cada etapa.



Fonte: O Autor

O método completo, conforme apresentado na Figura 3.1, é composto por três principais etapas (cartões em azul): mapeamento dos focos para áreas, separação e avaliação dos quadrantes, e cálculo da área queimada. Cada etapa recebe dados de entrada e produz uma saída que, com exceção da última etapa, é usada como entrada para a etapa subsequente.

A primeira etapa transforma os pontos dos focos em áreas que representam a abrangência do foco. Essa etapa recebe dados de focos de queimadas do INPE, previamente filtrados para o intervalo de tempo de interesse, e produz como saída as áreas de cada foco. Essas áreas estão diretamente relacionadas às características do satélite e sensor que captaram a imagem original, como abordado em 2.4, e, portanto, também precisam ser uma entrada para essa etapa.

Na segunda etapa, o espaço é dividido em quadrantes e avaliado. Esse passo recebe as áreas dos focos calculados na etapa anterior e o tamanho do quadrante, que pode ser definido pelo pesquisador. A saída são quadrantes com valores que representam a intensidade das queimadas ocorridas dentro de cada quadrante específico. A função de avaliação é proporcional à diversidade e quantidade das áreas de foco que interceptam os quadrantes.

Na terceira e última etapa, é realizado o cálculo das áreas queimadas, produzindo o resultado final do método. Essa etapa recebe como entrada os quadrantes avaliados no passo anterior e uma função de avaliação da área queimada, que pode ser definida pelo pesquisador. A função é aplicada a todos os quadrantes, resultando em um valor que representa a porcentagem provável de que a área do quadrante tenha sido queimada.

A Figura 3.1 também ilustra a aplicação completa do método em uma área específica localizada no sudoeste do Pará, durante os dias 1 a 3 de setembro de 2022. Na primeira imagem, são mostrados os focos de queimada, sem nenhum tipo de pré-processamento. Na segunda imagem, os pontos são transformados em áreas. Em seguida, o espaço é dividido em quadrantes e avaliados. Na última imagem, o cálculo da área queimada considera todas as avaliações acima do valor 5 como quadrante totalmente queimado, resultando em uma área queimada de $33,32 km^2$.

O método é flexível e altamente configurável, podendo assim gerar resultados bem diferentes dependendo de suas entradas, ainda que para o mesmo conjunto de dados de focos. O pesquisador pode testar combinações de entradas e avaliar os resultados usando algum comparador (benchmark). Um exemplo seria compara as saídas do método com os resultado obtidos pelo produto AQ1km (abordado no capítulo 2.5). Por fim, a aplicação

do método bem como os resultados obtidos são abordados no capítulo 5.

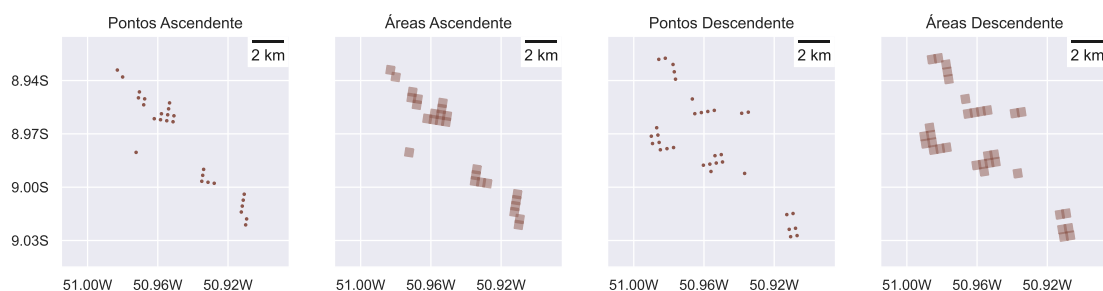
3.2 Mapeamento dos focos para áreas

Quando um foco de queimada é detectado pelo INPE a partir de um satélite, o foco representa uma área quadrada aproximadamente do tamanho da resolução do sensor que capturou a imagem original. Ou seja, um foco detectado a partir de imagens do satélite AQUA, que utiliza o sensor MODIS, representa uma área de $\approx 1Km^2$. Para um satélite com o sensor menos preciso, como o GOES-13, que utiliza o sensor GOES I-M com resolução espacial de $4Km$, a área representada seria 16 vezes maior, indicando uma menor precisão.

O cálculo exato da área coberta pelo foco deve levar em conta, além da resolução do sensor, as distorções provenientes dos seguintes fatores: Diferença de localização entre o foco e o satélite, e as características da órbita do satélite. No primeiro fator, quanto maior a distância entre os dois pontos, maior será a distorção em relação a área de cobertura do sensor. Para um satélite geoestacionário, por exemplo, essa distância é sempre muito grande, devido a sua órbita com altura de $36Km$ (Embrapa Territorial, 2023).

No segundo fator, a inclinação dos satélites determinam como é a rotação da área coberta. Os satélites que orbitam a Terra em órbitas polares, possuem uma determinada inclinação que lhes permitem cobrir diferentes áreas de todo o planeta durante sua trajetória (Figura 2.1). Quando o satélite está se movendo em uma trajetória ascendente, ou seja, do sul para o norte, a área coberta pelo sensor deve ser rotacionada em um sentido. Por outro lado, se a trajetória for descendente, do norte para o sul, a rotação deve ser no outro sentido.

Figura 3.2 – Comparação entre pontos e áreas dos focos detectados pelo satélite Suomi NPP.



Fonte: O Autor

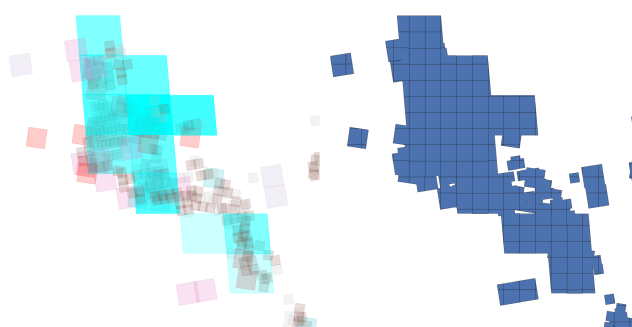
A Figura 3.2 apresenta dados coletados pelo satélite Suomi NPP no dia dois de setembro de 2022. O primeiro par de imagens corresponde à órbita ascendente do satélite, enquanto o segundo par de imagens corresponde à órbita descendente. Observa-se que, na primeira e terceira imagens, os pontos dos focos de queimada estão alinhados, mas ligeiramente rotacionados em alguns graus, coincidindo com a inclinação do satélite. Na segunda e quarta imagens, os pontos ganham a área do sensor (500m) e encaixam perfeitamente entre seus vizinhos. A partir desse ponto até o final do documento, a área coberta pelo foco será chamada de medição.

3.3 Separação e avaliação de quadrantes

A separação entre quadrantes é a forma de discretizar os dados do espaço, que são contínuos. Os quadrantes abstraem os detalhes das medições dos diferentes satélites, com diferentes áreas e orientações. Como resultado, ilustrado na figura 3.3, temos uma grade regular que é usado para as operações de avaliação de serão descritas a seguir.

O tamanho do quadrante é uma entrada dessa etapa e pode ser definida pelo pesquisador. O valor recomendado desta entrada fica em torno de 0,004 a 0,005 graus, o que coincide com o tamanho da menor resolução de sensor presente nos dados, que é o VIIRS de 500m.

Figura 3.3 – Separação entre quadrantes.



Fonte: O Autor

Com a distribuição dos quadrantes definida, é necessário atribuir a cada um deles um valor que represente a probabilidade de que a área contida tenha sido queimada. A avaliação dos quadrantes deve valorizar aqueles que apresentam medições de diferentes satélites. Essa abordagem justifica-se pelo fato de que ajuda a reduzir os ruídos nas medições e a identificar queimadas mais intensas. Além disso, diferentes satélites realizam

medições em horários distintos (veja a Figura 2.3), o que indica uma queimada mais prolongada. Em ambos os casos, queimadas mais intensas e duradouras sinalizam um maior potencial de o fogo se espalhar para outras áreas da vegetação.

Sendo q o quadrante (polígono) a ser avaliado; M um conjunto de todas as medições (área coberta pelo foco); operação $area(p)$ retorna a área de um polígono p qualquer; operação $unique_satellite(Q)$ retorna todos os satélites diferentes do conjunto Q ; min_area é a área mínima de uma medição; $threshold_satellite$ é o número mínimo de satélites para não ser penalizado. A definição formal da avaliação é dada por:

Para cada quadrante (q), é realizado o cálculo da intersecção com cada medição (m) contida nele, resultando em um conjunto Qm :

$$Qm = \{m \in M \mid m \cap q\} \quad (3.1)$$

Em seguida, é realizada uma filtragem no conjunto Qm , removendo todos os elementos que não possuem uma determinada área mínima, resultando em Qm' :

$$Qm' = \{m \in Qm \mid area(m) \geq min_area\} \quad (3.2)$$

A partir de Qm' , é extraído o número de satélites diferentes presentes nesse conjunto, que é denominado Us :

$$Us = \{m \in unique_satellite(Qm')\} \quad (3.3)$$

Além disso, é calculada a soma das áreas de Qm' e dividida pela área total de q , resultando em ia . Ou seja, quantas vezes as áreas de Qm' cabem dentro de q :

$$ia = \left(\sum_m^{Qm'} area(m) \right) \div area(q) \quad (3.4)$$

Penalização de quadrantes que tenham poucos satélites diferentes, o valor de c fica entre 0 e 1 e é linear.

$$c = 1 - \min \left(1, \frac{|Us|}{threshold_satellite} \right) \quad (3.5)$$

Finalmente, a avaliação final do quadrante (aq) é obtida pela expressão:

$$aq = |Us|^2 + ia - ai \cdot c \quad (3.6)$$

A fórmula final 3.6 atribui um peso quadrático à quantidade de satélites diferentes presente no quadrante q . Isso garante que, à medida que a diversidade de satélites aumenta dentro do quadrante, o valor de aq aumente de forma exponencial e se destaque dos demais quadrantes com menos diversidade. O resultado é somado com ai , que representa quantas vezes a área das medições somadas cabe no quadrante q . Esse termo impede que medições com pouca interseção dentro do quadrante tenham uma influência desproporcional no resultado final.

Além disso, há uma penalização aplicada aos quadrantes que apresentam poucos satélites diferentes. Quando a quantidade de satélites diferentes em um quadrante é maior do que um limite pré-estabelecido, chamado de *threshold_satellite*, não há penalizações, ou seja, o valor de c é igual a 0. Por outro lado, quando o quadrante não atinge o limite, uma parcela de ai é descontada do resultado final.

Essa etapa é considerada concluída quando todos os quadrantes estão avaliados seguindo as equações apresentadas. Desta forma, a avaliação de um quadrante não depende de outras avaliações de seus vizinhos ou outra forma de dependência de dados, o que possibilita a avaliação paralela dos quadrantes.

3.4 Cálculo da área queimada

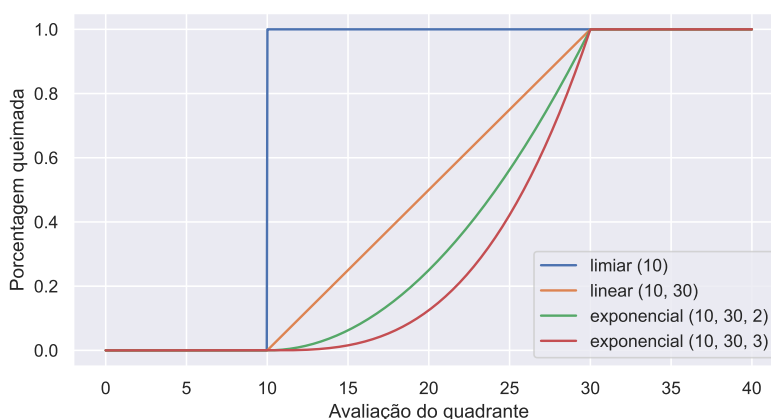
Finalmente, com os quadrantes avaliados, é possível estimar a área queimada para cada quadrante. É importante que o método de cálculo seja flexível, permitindo que o pesquisador teste diferentes métodos. Uma forma de fazer isso é atribuir um número que represente a porcentagem de área queimada dentro do quadrante e, em seguida, multiplicá-lo pela área total do quadrante para obter a área queimada dentro do quadrante. Após calcular a área queimada de cada quadrante, é necessário somar todos esses valores para obter a área total queimada.

Nesse sentido, o papel do pesquisador é definir uma função ($eval(v)$) que receba o valor do quadrante, calculado na etapa anterior, e retorne um número real entre zero e um. Essa função também pode receber o maior e o menor valor presente na avaliação dos quadrantes, valores que podem ser usados para normalizar o cálculo. Ou seja, o pesquisador pode definir uma função linear que indique que o quadrante só deve ser considerado totalmente queimado se o valor do quadrante for o maior.

Para facilitar o trabalho do pesquisador, a implementação pode fornecer funções embutidas comuns que definem a função $eval(v)$. Na Figura 3.4, são apresentadas al-

gumas possibilidades de definições para essa função. A função mais simples é chamada de limiar, que estabelece que toda a área do quadrante deve ser considerada queimada se a avaliação for maior que um determinado valor e nenhuma área deve ser considerada queimada se não alcançar esse valor. Outra função simples é a linear, que faz o valor da área queimada crescer de forma linear dentro de um valor máximo e mínimo. A última função é a exponencial, semelhante à linear, mas com uma exponenciação que faz o valor crescer mais lentamente no início e de forma mais acentuada no final do intervalo.

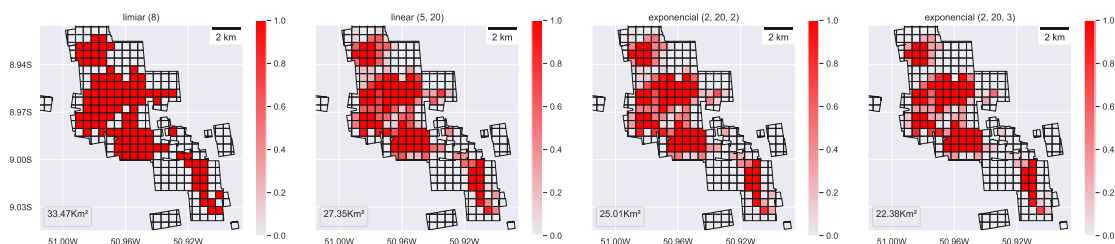
Figura 3.4 – Funções embutidas para cálculo de área.



Fonte: O Autor

A Figura 3.5 ilustra claramente como diferentes funções e parâmetros podem afetar significativamente os resultados na determinação da área queimada. Cada gráfico mostra a área queimada total calculada usando a função de área queimada indicada no título. Observa-se que a função limiar identifica mais áreas como queimadas, pois trata de forma igual os quadrantes com diferentes níveis de intensidade. No entanto, as funções exponenciais parecem mais próximas da realidade, já que consideram apenas uma porcentagem da área dos quadrantes próximos aos agrupamentos de alta intensidade como queimados.

Figura 3.5 – Exemplo da aplicação das funções embutidas.



Fonte: O Autor

4 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO

Após a formalização do método de forma abstrata, esse capítulo descreve sobre a implementação de fato do método. Primeiro está discutido como os dados do DBQueimadas foram coletados da base de forma automatizada. Em seguida, descreve-se sobre a implementação do método

4.1 Coleta dos dados

Uma parte fundamental do processo foi coletar os dados do site DBQueimadas, que é a fonte primária usada para cálculo das áreas queimadas. Para exportar os dados usando o navegador, é necessário preencher um formulário com os campos de data inicial, data final e um endereço de e-mail, com intervalo de tempo máximo um ano para cada pedido. Também é possível aplicar filtros ainda mais específicos, como continente, país, estado, município, satélite, bioma e unidades de conservação/terras indígenas. Após clicar em "Exportar", uma mensagem contendo um link de download é enviada para o e-mail informado, e o arquivo disponibilizado é um CSV compactado em formato zip.

Embora o site tenha boa usabilidade, seria impraticável baixar todos os dados do Brasil manualmente sem sobrecarregar os servidores no INPE. Por isso, foi necessário entender como a solicitação dos dados era processada pelo site e, assim, automatizar o download. Foi identificado que o site faz uma requisição GET para a API do DBQueimadas, localizada em <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/exportacaobdq/exportar>, passando os parâmetros codificados em JSON da URL, incluindo os filtros, e-mail e formato de arquivo desejado. Um exemplo de uso dessa API por meio de uma chamada CURL pode ser encontrado no ??.

Para automatizar o processo, desenvolvemos um script em Python que solicitava os dados de cada 30 dias, totalizando 300 requisições desde 1998 até 2022. Para não sobrecarregar os servidores do INPE, adicionamos uma espera de um minuto entre as requisições. Além disso, implementamos um sistema de registro de requisições em arquivo, que armazenou o estado de cada uma delas, evitando requisições duplicadas e possibilitando a retentativa das requisições que falharam por algum motivo. O programa foi considerado concluído apenas quando todas as requisições contidas no registro estavam marcadas como concluídas.

Para concluir o processo, ainda era necessário fazer o download do arquivo por

meio do link enviado por e-mail. Utilizamos o Google Scripts, uma ferramenta que possibilita escrever programas simples, utilizando uma linguagem semelhante a JavaScript, com integração aos serviços do Google (como o Gmail). O script era executado com um intervalo de dois minutos, varrendo todos os e-mails novos provenientes do DBQueimadas. Com ele, foi possível extrair o link de cada mensagem e, finalmente, salvar o arquivo de forma automatizada.

Os dois scripts trabalharam de forma concomitantemente, funcionando como uma espécie de produtor e consumidor distribuído. Enquanto um requisitava os dados para do INPE, o outro vasculhava os e-mails e salvava o arquivo em uma pasta específica. Quando o primeiro script identificava (por meio do nome do arquivo) que a resposta já estava salva, marcava a requisição como concluída no registro. Caso uma requisição permanecesse por mais de 30 minutos no estado pendente, o script fazia uma nova solicitação aos servidores do INPE.

Todo o processo de investigação e recuperação dos dados levou cerca de uma semana. Todos os arquivos baixados ocupam pouco mais de 4 gigabytes de armazenamento em disco e, juntos, somam exatamente 43.782.758 linhas. Ao final, eles foram recompatados em um único arquivo zip (450 megabytes) que está disponível para download em <<https://bit.ly/3IgHIXH>>, independentemente dos servidores do INPE.

Também foi utilizado os dados públicos territoriais do Brasil provenientes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para gerar gráficos delimitados em municípios, unidades federativas e biomas. O processo de aquisição desses arquivos se deu diretamente no site do IBGE. Todos os arquivos baixados estão no formato Shapefile, que é o formato responsável por armazenar dados vetoriais geográficos.

4.2 Implementação do método

Para toda a implementação e análise dos dados, foram utilizadas diversas ferramentas do ecossistema Python para Data Science, tais como NumPy, Pandas e Matplotlib. Além disso, foram empregadas bibliotecas específicas para análise de dados geográficos, como GeoPandas, Pysal, Xarray e Shapely. Para garantir a reprodutibilidade das execuções e a organização do código, foi adotado o Jupyter Notebook. Todos o código e demais artefatos gerados durante o projeto podem ser encontrados em <<https://github.com/josebraz/INPE-Queimadas>>, disponibilizados sob a licença MIT.

A biblioteca GeoPandas, amplamente utilizada na implementação, é uma extensão

do Pandas que adiciona uma coluna especial chamada 'geometry'. Essa coluna permite armazenar as coordenadas e o formato dos dados em um sistema de coordenadas pré-definido. Além disso, o GeoPandas integra-se à biblioteca Shapely, que é usada para realizar cálculos e operações em estruturas geométricas espaciais. Com o uso dessas bibliotecas, é possível executar operações avançadas da teoria dos conjuntos em elementos geométricos, como união, interseção, diferença, entre outras, além de calcular a área de qualquer polígono que represente uma área no espaço.

O GeoPandas também oferece suporte à operação de junção espacial (spatial join) de forma otimizada. O spatial join permite combinar diferentes conjuntos de dados com base em sua relação espacial, de maneira semelhante a uma junção em um banco de dados, porém levando em consideração a proximidade geográfica. É possível utilizar diferentes critérios de proximidade geográfica, como verificar se um ponto está dentro de um polígono ou determinar a interseção entre dois polígonos. No contexto da implementação, o spatial join é utilizado para obter todas as medições que intersectam cada quadrante (interseção entre dois polígonos), que é a principal informação usada para avaliar um quadrante.

Após a coleta de dados mencionada anteriormente, os dados foram carregados no Python e algumas otimizações nas estruturas foram realizadas. Os 300 arquivos das queimadas foram lidos pelo Pandas e concatenados em um único DataFrame. Foi necessário converter o fuso horário das datas, que estavam no formato UTC, para o fuso horário de Brasília, a fim de facilitar a compreensão dos gráficos para os usuários brasileiros. Além disso, as colunas de texto, como município, estado, país e satélite, foram convertidas em categorias, que são uma forma de enumeração disponível no Pandas. Essa conversão ajudou a reduzir o consumo de memória, uma vez que muitos valores repetidos ocorriam nessas colunas, ocupando 2 Gb em memória.

Para otimizar o processamento e a leitura dos dados, também foi utilizada a biblioteca Dask especializada no processamento paralelo e distribuído. Essa biblioteca oferece a capacidade de criar clusters locais ou se conectar a clusters remotos, permitindo o envio de tarefas completas para serem processadas pelo cluster. Além disso, o Dask possibilita a leitura dos arquivos de forma paralela, o que resulta em uma redução significativa no tempo de carregamento dos dados. Após o carregamento completo do DataFrame a partir dos arquivos CSV originais durante a primeira execução, foi criado um arquivo no formato H5 que contém os mesmos dados, mas com uma estrutura otimizada para permitir uma leitura mais rápida. Nas execuções subsequentes do programa, ao invés de carregar

novamente os arquivos CSV, o programa fará a leitura desse único arquivo H5, resultando em um carregamento ainda mais rápido dos dados.

Durante o pré-processamento dos dados, foram identificadas regras de nomenclatura especiais para alguns satélites. No caso dos satélites AQUA (AQUA_M-T e AQUA_M-M) e TERRA (TERRA_M-T e TERRA_M-M), a última letra indica o período do dia em que ocorreu a passagem do satélite, sendo "M" para Manhã e "T" para Tarde. Outros satélites, como Suomi NPP, NOAA-19, NOAA-18, NOAA-16, NOAA-15 e NOAA-12, podem apresentar a última letra do nome como "D" para Diurno. Com base nessa compreensão das regras de nomenclatura, foi possível criar uma nova coluna que fornece o nome simplificado dos satélites, facilitando algumas análises. Em comparação com a coluna original dos satélites, que tinha 32 valores possíveis, a nova coluna contém apenas 22 valores possíveis. Para cada satélite, foi escolhida uma cor única, conforme apresentado na Figura 4.1, que é utilizada em todos os gráficos apresentados neste documento.

Figura 4.1 – Cores escolhidas para cada satélite.



Fonte: O Autor

.... removido satélites ATSR removido satélites TRMM

....

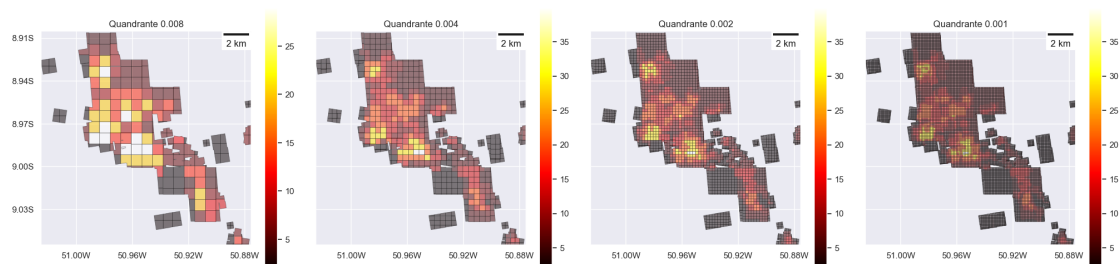
A implementação das áreas dos focos, chamado de medições, usou os dados de satélites de forma fixa no código (hardcoded). Apesar de existir bibliotecas especializadas em cálculos de órbitas de satélite, como a Orbital, essa abordagem foi escolhida a fim de evitar a necessidade de internet para execução do programa e simplificar o código.

Para simplificar e otimizar a implementação da parte das áreas dos focos, foi

A separação em quadrantes também foi planejada para melhorar o desempenho do processamento. Ao dividir o problema em partes menores, é possível resolver cada uma de forma paralela, pois as avaliações dos quadrantes são independentes entre si. Além disso, a separação em quadrantes otimiza ainda mais o processamento da junção espacial, que se beneficia quando os quadrantes para a interseção não são muito grandes. No

entanto, é importante considerar que quanto maior o quadrante utilizado, menos avaliações são necessárias, mas a precisão da área queimada também é reduzida. Como se trata de um espaço bidimensional, a complexidade computacional da avaliação em relação à quantidade de quadrantes é $O(n^2)$.

Figura 4.2 – Diferença da avaliação para diferentes tamanhos de quadrantes.



Fonte: O Autor

Com base em experimentos, foi constatado que o uso de quadrantes muito pequenos (com menos de 0,002 graus quadrados) não aumentam significativamente a precisão dos resultados e tornam a execução muito mais demorada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Aplicações do método

O método em si é geral para qualquer entrada de focos de satélites, e retorna no final polígonos representando áreas geográficas associadas a um valor que indica a área queimada dentro desse polígono. Variando a entrada do método e o agrupamento dos resultados preliminares, pode-se obter diferentes resultados finais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

REFERÊNCIAS

CHUVIECO, E. et al. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite earth observation. **Remote Sensing of Environment**, v. 225, p. 45–64, 2019. ISSN 0034-4257. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425719300689>>.

Divisão de Geração de Imagens. **Geração de imagens**. 2023. Disponível em: <<https://www.dgi.inpe.br/>>. Acesso em: 16 de fev. 2023.

EARTHDATA. **Data Processing Levels**. 2023. Disponível em <<https://www.earthdata.nasa.gov/engage/open-data-services-and-software/data-information-policy/data-levels>>. Acesso em: 3 de jun. 2023.

Embrapa Territorial. **Satélites de Monitoramento**. 2023. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/>>. Acesso em: 28 de jan. 2023.

FUCHS, V. B. Chinese-driven frontier expansion in the amazon: four axes of pressure caused by the growing demand for soy trade. **Civitas - Revista de Ciências Sociais**, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, v. 20, n. Civitas, Rev. Ciênc. Soc., 2020 20(1), p. 16–31, Jan 2020. ISSN 1519-6089. Disponível em: <<https://doi.org/10.15448/1984-7289.2020.1.34656>>.

GIGLIO, L. et al. The collection 6 modis burned area mapping algorithm and product. **Remote Sensing of Environment**, v. 217, p. 72–85, 2018. ISSN 0034-4257. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425718303705>>.

GIGLIO, L. et al. An active-fire based burned area mapping algorithm for the modis sensor. **Remote sensing of environment**, Elsevier, v. 113, n. 2, p. 408–420, 2009.

GIGLIO, L. et al. Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. **Biogeosciences**, Copernicus GmbH, v. 7, n. 3, p. 1171–1186, 2010.

GIGLIO, L.; SCHROEDER, W.; JUSTICE, C. O. The collection 6 modis active fire detection algorithm and fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 178, p. 31–41, 2016. ISSN 0034-4257. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425716300827>>.

INPE. **Área queimada**. 2023. Disponível em: <<https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/aq1km/>>. Acesso em: 24 de abr. 2023.

INPE. **Programa Queimadas Perguntas frequentes**. 2023. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas/portal/informacoes/perguntas-frequentes>>. Acesso em: 23 de jan. 2023.

LEONEL, M. O uso do fogo: o manejo indígena e a piromania da monocultura. **Estudos Avançados**, Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo, v. 14, n. Estud. av., 2000 14(40), p. 231–250, Sep 2000. ISSN 0103-4014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-40142000000300019>>.

LIBONATI, R. et al. On a new coordinate system for improved discrimination of vegetation and burned areas using mir/nir information. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 6, p. 1464–1477, 2011. ISSN 0034-4257. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425711000496>>.

LIBONATI, R. et al. An algorithm for burned area detection in the brazilian cerrado using 4 μ m modis imagery. **Remote sensing**, v. 7, n. 11, p. 15782–15803, 2015.

LIZUNDIA-LOIOLA, J. et al. A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250m from modis data. **Remote Sensing of Environment**, v. 236, p. 111493, 2020. ISSN 0034-4257. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425719305127>>.

MIRANDA, E. de; MARTINHO, P.; CARVALHO, C. de. Dinâmica de queimadas e incêndios na bacia do rio paraguai e no pantanal (2018 e 2020). Embrapa Territorial: Campinas, 2021., 2021.

NASA. **Data Maturity Levels**. [S.l.]: NASA, 2023. Disponível em: <<https://science.nasa.gov/earth-science/earth-science-data/data-maturity-levels/>>. Acesso em: 3 de jun. 2023.

PRODUCTS, A. D. T. I. **MODIS Standard Collection Versions**. 2023. Disponível em <<https://atmosphere-imager.gsfc.nasa.gov/collections/overview>>. Acesso em: 3 de jun. 2023.

REY, S. J.; ARRIBAS-BEL, D.; WOLF, L. J. **Geographic Data Science with Python**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <<http://geographicdata.science/book/notebooks/>>. Acesso em: 5 de jan. 2023.

SCHROEDER, W. et al. Validation of goes and modis active fire detection products using aster and etm+ data. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 5, p. 2711–2726, 2008. ISSN 0034-4257. Earth Observations for Terrestrial Biodiversity and Ecosystems Special Issue. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425708000102>>.

SETZER, A.; MORELLI, F.; SOUZA, J. C. O banco de dados de queimadas do inpe. **Biodiversidade Brasileira-BioBrasil**, n. 1, p. 239–239, 2019.

SETZER, A.; YOSHIDA, M. C. **Detecção de Queimadas nas Imagens do Satélite Geoestacionário GOES-12**. 2004. Disponível em: <https://queimadas.dgi.inpe.br/~rqueimadas/documentos/relat_goes12_3_4.htm>. Acesso em: 1 de fev. 2023.