


# Determinação do limiar crítico à ocorrência de incêndios no Parque Nacional de Brasília (Brasil) por meio da análise temporal utilizando índices espectrais

Determination of the critical threshold for the occurrence of fires in the Parque Nacional de Brasília (Brazil) through temporal analysis using spectral indices

Lucas Inácio da Silva<sup>1</sup> 

Gustavo Macedo de Mello Baptista<sup>2</sup> 

## Palavras-chave:

Análise  
Bioma  
Google Earth Engine  
Incêndio  
Monitoramento

## Resumo

O Cerrado brasileiro é um dos maiores biomas do Brasil. Infelizmente a pressão antrópica está agravando os processos de degradação do bioma e juntamente com os processos de estiagem, os eventos de fogo surgem como grande fator de preocupação. Devem ser concebidos ferramentas de monitoramento, principalmente os que envolvem os conceitos de sensoriamento remoto, antepondo-se ao fenômeno de fogo, mitigando os efeitos devastadores. Sendo assim, a presente pesquisa tem como objetivo a determinação do limiar crítico à ocorrência de incêndios por meio do diagnóstico das condições de verdor, umidade e senescência da vegetação utilizando da análise temporal de imagens “Sentinel-2” no Parque Nacional de Brasília, para isso, faz-se necessário a determinação quantitativa de cada condição por meio da análise de eventos passados, determinando o limiar de criticidade que condicione a região apresentar condições que favoreçam o início de um incêndio bem como a construção de um algoritmo, no “Google Earth Engine”. A área de estudo é o Parque Nacional de Brasília, com o acervo de dados de imagens “Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-1C” dentro do “Google Earth Engine”. O algoritmo visa construir um sistema de máscaras para remover materiais das cenas, bem como o cálculo dos índices NDVI, NDII, PSRI e dNBR, extraíndo os dados por meio da máscara de pixels queimados. Foi possível identificar seis períodos de ocorrência de fogo, a extração de dados permitiu a determinação estatística do limiar, sendo esse 0,580 para o NDVI, 0,015 para o NDII e 0.150 para o PSRI.

## Keywords

Analysis  
Biome  
Google Earth Engine  
Fire  
Monitoring

## Abstract

The Brazilian Savannah is one of the largest biomes in Brazil. Unfortunately, human pressure is aggravating the degradation processes of the biome and, together with the drought processes, fire events are a major concern. Monitoring tools must be designed, especially those involving the concepts of remote sensing, in anticipation of the fire phenomenon, mitigating the devastating effects. Therefore, the present research aims to determine the critical threshold for the occurrence of fires through the diagnosis of the conditions of greenness, humidity and senescence of the vegetation using the temporal analysis of Sentinel-2 images in the Parque Nacional de Brasília. Therefore, it is necessary to quantitatively determine each condition through the analysis of past events, determining the criticality threshold that conditions the region to present conditions that favor the onset of a fire, as well as the construction of an algorithm, in the Google Earth Engine. The study area is the Parque Nacional de Brasília, with the image data collection Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-1C inside the Google Earth Engine. The algorithm aims to build a masking system to remove materials from the scenes, as well as the calculation of the NDVI, NDII, PSRI and dNBR indices, extracting the data through the mask of burned pixels. It was possible to identify six periods of fire occurrence, the data extraction allowed the statistical determination of the threshold, which was 0,580 for the NDVI, 0,015 for the NDII and 0,150 for the PSRI.

<sup>1</sup> Universidade Católica de Brasília - UCB, Brasília, DF, Brasil. [silva.lucasinacio.11@gmail.com](mailto:silva.lucasinacio.11@gmail.com)

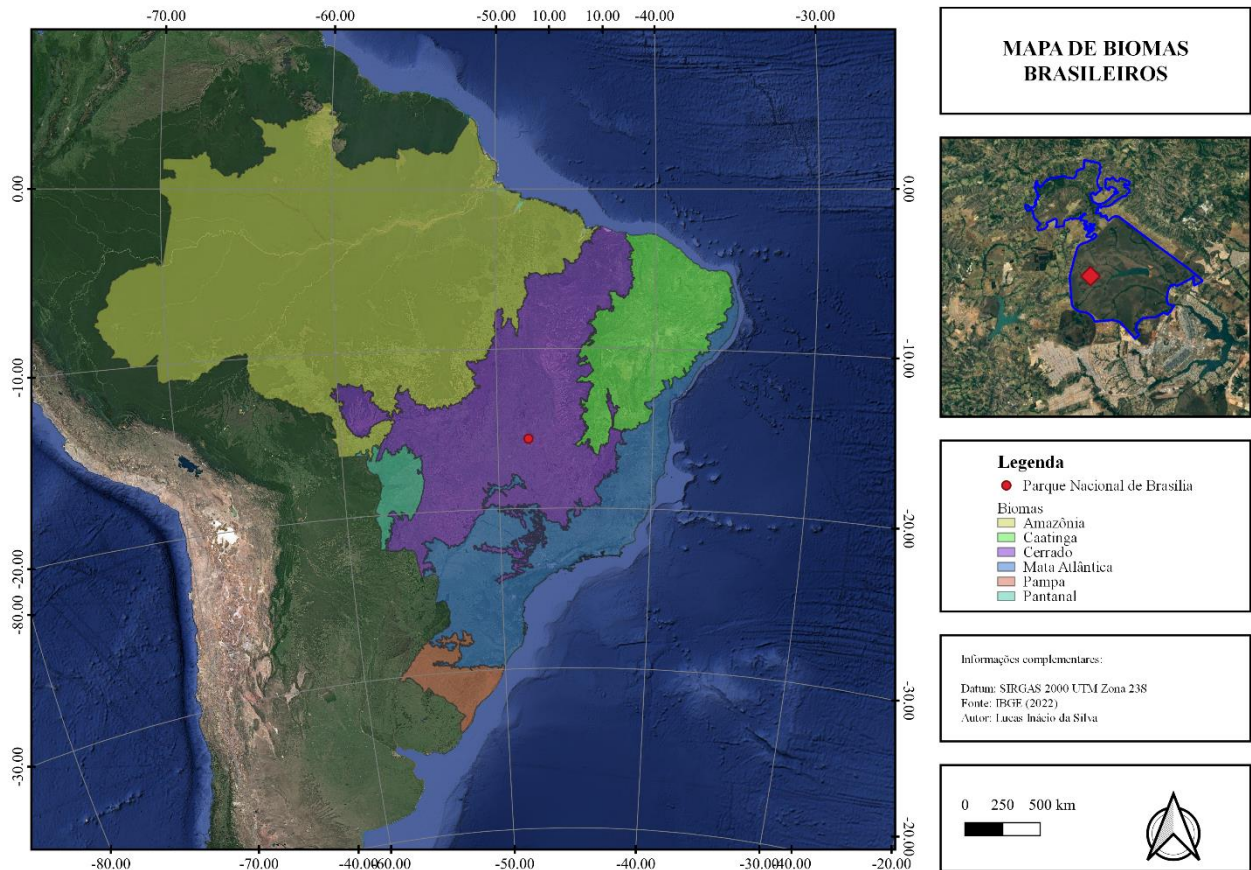
<sup>2</sup> Universidade de Brasília - UnB, Brasília, DF, Brasil. [gmbaptista@gmail.com](mailto:gmbaptista@gmail.com)

## INTRODUÇÃO

O Bioma Cerrado é tido como um dos maiores biomas existentes no território brasileiro, com extensão aproximada de 2 milhões de

quilômetros quadrados e está situado na região central do território brasileiro, conforme visto na Figura 1, e é um divisor natural dos biomas da Amazônia, Mata Atlântica e Caatinga (COLLI et al., 2020).

Figura 1 – Mapa de Biomas Brasileiros



Fonte: Os autores (2022).

O bioma apresenta rica biodiversidade e extensa lista de espécies de fauna e flora, porém, sofre com a crescente pressão antrópica, marcada pela expansão das atividades agrícolas e incêndios florestais, podendo ocorrer de forma natural ou por ação humana (HOFMANN et al., 2021).

O Cerrado apresenta temporadas de seca, que fornecem um ambiente propício para ocorrência de eventos de fogo, levantando questões sobre o papel fundamental de ferramentas de prevenção, vigilância, detecção e combate ao fogo (HOFMANN et al., 2021; VERNOOIJ et al., 2021). Tais eventos funcionam também como manutenção dos ecossistemas, porém o manejo e monitoramento é essencial a fim de manter os impactos sob controle, evitando o espalhamento das chamas e o perigo a biodiversidade (RIBEIRO et al., 2019).

Técnicas e sistemas de monitoramento do fogo devem ser pensados para se antepor ao

evento, fornecendo subsídios para tomada de decisões, logo um bom sistema de monitoramento visa auxiliar a gestão de esforços, produzindo soluções específicas de intervenções em tais eventos (BARMPOUTIS et al., 2020).

Considerando que sistemas de monitoramento territoriais geralmente envolvem grandes dimensões, o sensoriamento remoto surge como poderosa ciência e ferramenta, permitindo a criação de mecanismos de grande potencial de análise de massa de dados (BARMPOUTIS et al., 2020).

Os eventos de fogo demonstram a fragilidade ambiental dos ecossistemas, em especial, os da vegetação nativa e estudar a severidade desses eventos é importante para a verificação das consequências ecológicas, econômicas e físicas da região afetada, coordenando estrategicamente as ações de mitigação

(FASSNACHT et al., 2021; FERNÁNDEZ-MANSO; QUINTANO, 2020).

Baptista et al. (2018) e Bento-Gonçalves et al. (2019) sugerem que a avaliação, por meio do sensoriamento remoto, dos indicadores de verdor, umidade e senescência podem ser um marco importante para determinar as metodologias de monitoramento das áreas que podem ter potencial combustível, visto que essas áreas possuem pixels diferentes das áreas que não queimaram, indicando susceptibilidade à incêndio.

A ocorrência de incêndios, sejam de causas antrópicas ou não, representam um perigo em potencial para fauna, flora e vidas humanas, conforme pôde ser observado nos eventos de Portugal, durante o ano de 2017 (BAPTISTA et al., 2018) ou em diversos países, como a Austrália, o Brasil, o Canadá, a R.D. Congo, a Grécia, a Indonésia, a Rússia, a Espanha e os EUA (BENTO-GONÇALVES, 2022). A adoção de ferramentas e políticas de prevenção e predição de incêndios de forma sólida e eficiente torna-se necessária para o correto direcionamento de medidas de intervenção a fim de minimizar o impacto gerado pela propagação de um incêndio.

As estratégias de manejo geralmente são feitas de forma pontual e a adoção do uso de dados espaciais pode ampliar as ações relacionadas ao manejo integrado de fogo, logo, é possível levantar a hipótese de que é possível avaliar os eventos de incêndios que ocorreram no Parque Nacional de Brasília, a partir de 2015 (ano de início de imagens do “Sentinel-2”) e

estipular limites críticos de verdor, umidade e senescência dessas áreas.

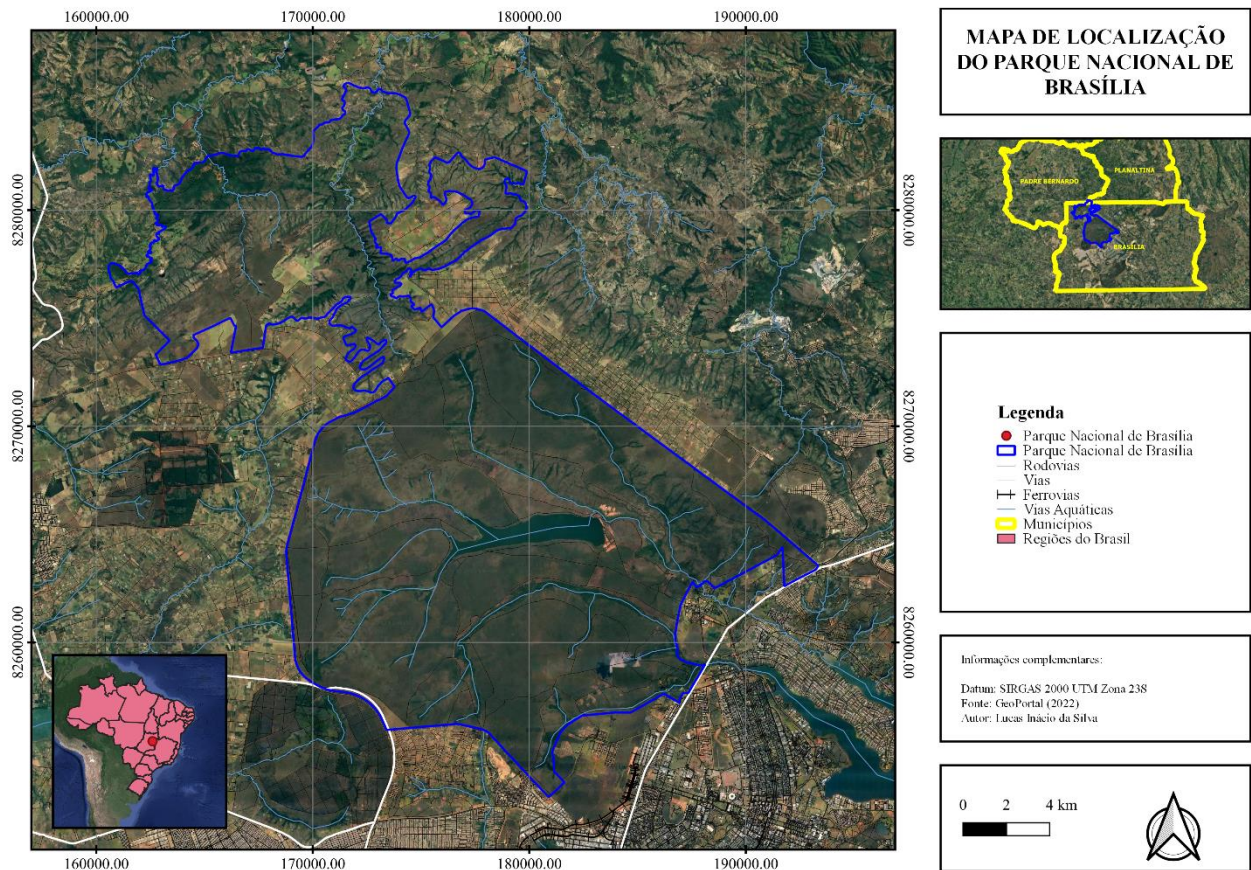
Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo geral a determinação do limiar crítico à ocorrência de incêndios por meio do diagnóstico das condições de verdor, umidade e senescência da vegetação utilizando da análise temporal de imagens “Sentinel-2” no Parque Nacional de Brasília. Sendo assim, faz-se necessário a determinação quantitativa de cada condição por meio da análise de eventos passados, determinando o limiar de criticidade que condicione a região a ser um potencial ignitor para eventos de fogo bem como a construção de um algoritmo, no “Google Earth Engine” – GEE, baseado na metodologia proposta.

## MÉTODOS

### *Área de Estudo*

A área de estudo em questão é o Parque Nacional de Brasília, situado no noroeste do Distrito Federal. O parque é uma Unidade de Conservação de Proteção Integral e foi criado em 29 de novembro de 1961 sob o Decreto N° 241 e possui aproximadamente 42.389 hectares, abrangendo as regiões administrativas do Plano Piloto, Sobradinho, e Brazlândia, bem como uma porção dos municípios goianos de Padre Bernardo e Planaltina, conforme observado na Figura 2.

Figura 2 - Localização do Parque Nacional de Brasília

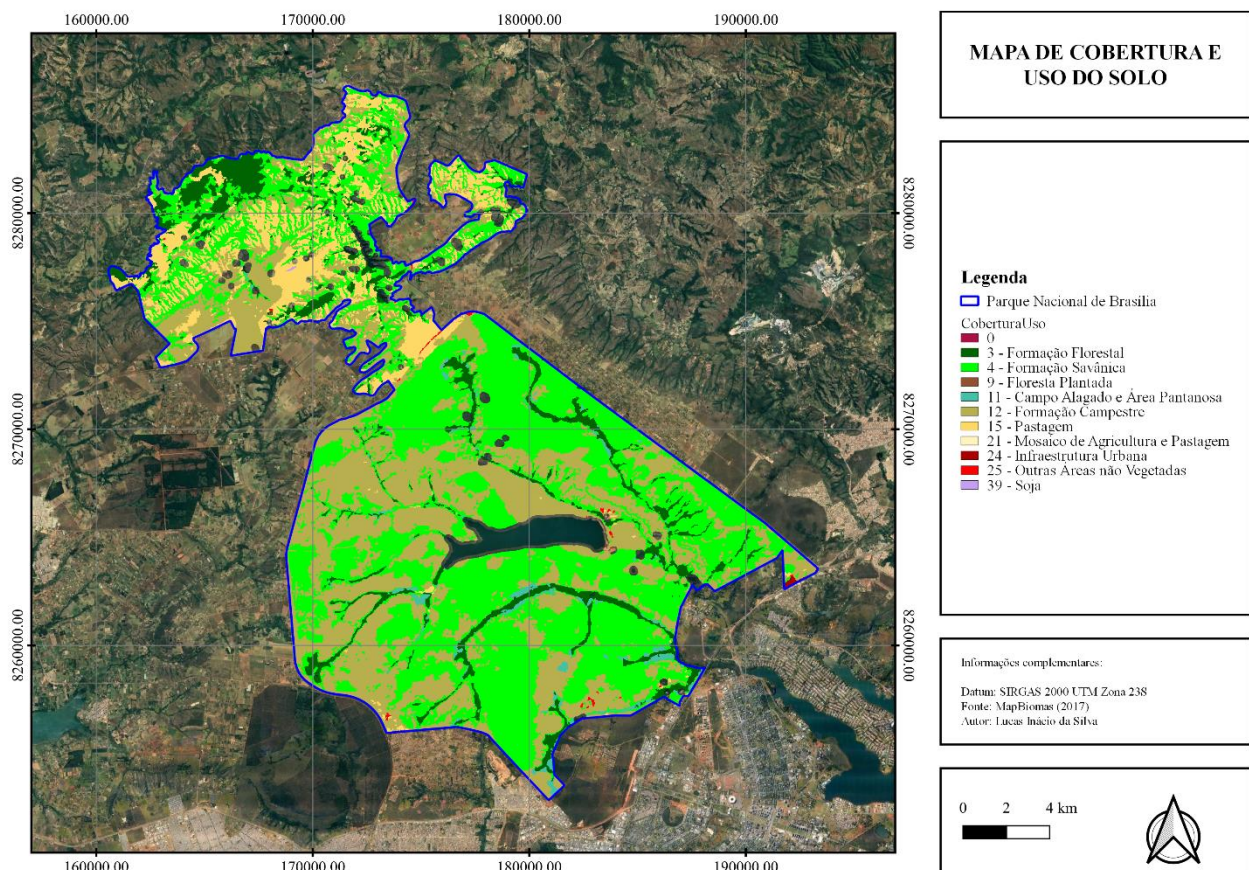


Fonte: Os autores (2022).

A cobertura e uso do solo, por se tratar de uma Unidade de Conservação de Proteção integral, é predominantemente constituída de

formações vegetais florestais, savânicas e campestre, conforme observado na Figura 3.

Figura 3 – Cobertura e uso do solo do Parque Nacional de Brasília



Fonte: Os autores (2022).

### Ambiente SIG

Será utilizado o “GEE”, que é uma plataforma online de processamento, visualização e manipulação de dados geográficos (GORELICK et al., 2017). Graças a sua grande capacidade de processamento será possível desenvolver uma rotina capaz de realizar as análises necessárias para os períodos em estudo, o que mitiga o grande tempo de manipulação de dados exigido nos meios convencionais de processamento no sensoriamento remoto.

### Acervo de Dados

Foi utilizado, dentro do “GEE”, o acervo de imagens multiespectrais do programa “Copernicus” denominado “Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-1C”. As imagens desse segmento, segundo a “European Space Agency”, já foram sistematicamente processadas pelas estações de controle terrestre, que no caso é o “Payload Data Ground Segment”. Essa coleção realoca os

valores dos pixels das imagens obtidas após 25 de janeiro de 2022, para que respeite o intervalo de valores dos dados antigos.

Os produtos desse acervo já são enviados do “Payload Data Ground Segment” com a telemetria analisada, descomprimidos, com as devidas correções e calibrações radiométricas e geométricas e com valores reamostrados para dados de reflectância. O produto não apresenta solução para calibração atmosférica, que será realizada aplicando o “Sensor Invariant Atmospheric Correction”, presente em uma biblioteca no “GEE”, desenvolvido e validado por MarcYin (2019a) e MarcYin (2019b), sendo utilizado por Nursaputra et al. (2021) e Carella et al. (2022).

Os produtos normais “Level-1C” e “Level-2A” não foram utilizados porque, para o primeiro, os valores das imagens antigas não estão nos mesmos intervalos das imagens novas, o que poderia prejudicar processos automáticos dentro da plataforma, e para o segundo, não existem imagens corrigidas para todo o período que se deseja fazer a pesquisa.

### Procedimentos metodológicos da pesquisa

Serão descritos os procedimentos utilizados para obtenção dos resultados e objetivo da pesquisa.

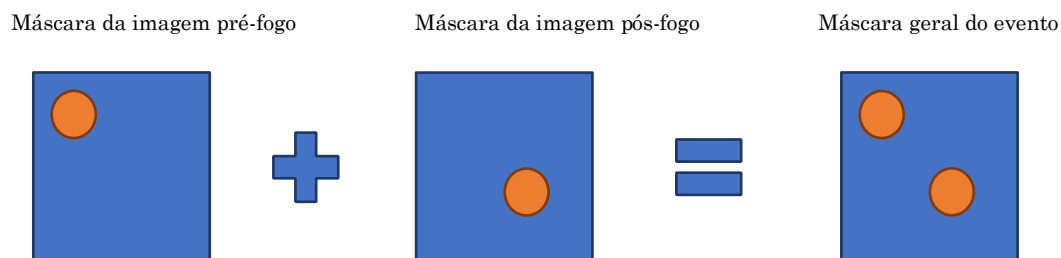
#### Determinação dos períodos de evento

Para o desenvolvimento da metodologia, foi-se necessário identificar períodos em que ocorreram eventos de fogo dentro do Parque Nacional de Brasília. Sendo assim, identificou-se, com o auxílio dos sistemas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, seis períodos de ocorrência de eventos, os quais, para cada evento, foi-se necessário identificar duas imagens, uma pré e uma pós-fogo.

### Filtragem espacial das cenas

Visando aperfeiçoar os processos automáticos construídos dentro da plataforma, mitigando os efeitos negativos oriundos do uso de índices espectrais, utilizou-se de máscaras espaciais para filtrar os elementos em questão, permitindo que apenas as regiões com material vegetal fossem analisadas. Para isso, utilizou índices espectrais para identificação de nuvens, sombra de nuvens, água e por fim, como forma de garantir que as regiões analisadas não sofram com interferências não-vegetais. A Figura 4 demonstra como foi obtida a máscara geral.

Figura 4 – Metodologia de criação da máscara geral do evento



Fonte: Os autores (2022).

Para identificação das nuvens, utilizou-se o produto “Sentinel Cloud Probability”, fornecido pelo “Sentinel Hub”, desenvolvido sobre o algoritmo “Sentinel2-Cloud-Detector”, em conjunto com a biblioteca “LightGBM”. Utilizou-se o valor de 50%, o que indica que foram filtrados os pixels que apresentam 50% de certeza quanto ao conteúdo adjacente ao pixel ser realmente nuvem.

Para a identificação de sombra de nuvens, utilizou-se os conceitos obtidos em Magno et al. (2021), o “Cloud Shadow Index” – CSI, sistematizados na Equação 1, e filtrado nos limiares de interesse para identificação de sombras, graças ao comportamento específico da banda “Shortwave Infrared” do sensor “Multispectral Instrument”.

$$CSI = \frac{(1 - \rho_{2.2})^2}{2 \times 2.2} \quad \text{Equação 1}$$

Utilizou-se, para identificação de corpos hídricos, o “Normalized Difference Water Index” – NDWI, proposto por McFeeters (1996) e o “Sentinel Water Mask”, proposto por Milczarek et al. (2017). Os índices, conforme podem ser obtidos, respectivamente, pelas Equação 2 e Equação 3, ressalta os corpos hídricos.

$$NDWI = \frac{\rho_{0.55} - \rho_{0.65}}{\rho_{0.55} + \rho_{0.65}} \quad \text{Equação 2}$$

$$SWM = \frac{\rho_{0.45} - \rho_{0.55}}{\rho_{0.85} + \rho_{1.60}} \quad \text{Equação 3}$$

As máscaras pré e pós-fogo forma obtidas calculando os índices supracitados para as imagens em questão. Após o cálculo de ambas, foi calculado para cada período a máscara geral do evento, composta pelas máscaras pré e pós-fogo. Ela serviu para garantir que a análise dentro da plataforma funcionasse para qualquer período em questão, considerando que não seriam analisados pixels não presentes em uma imagem e que não estivesse em outra, garantindo assim a homogeneidade da análise.

Ainda visando os procedimentos da plataforma, optou-se por realizar um “buffer” de 120 metros (ou 12 pixels do sensor) para mitigar os efeitos de transição do material.

### Índices Espectrais

Nesta seção será demonstrada a metodologia central da pesquisa.

#### Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

O “Normalized Difference Vegetation Index” – NDVI evidencia o verdor da vegetação baseando-se absorção do vermelho e do infravermelho próximo através de uma simples

matemática de banda entre as camadas do vermelho (0,65  $\mu\text{m}$ ) e infravermelho próximo (0,85  $\mu\text{m}$ ) a qual pretende criar uma representatividade entre os alvos de maior emissão de vermelho e infravermelho (ROUSE et al., 1974). Para o cálculo do NDVI, utilizou-se a Equação 4.

$$NDVI = \frac{\rho_{0.85} - \rho_{0.65}}{\rho_{0.85} + \rho_{0.65}} \quad \text{Equação 4}$$

O índice varia de -1 a 1 onde valores abaixo de 0,2 evidenciam ausência de atividade fotossintética, ou seja, o índice evidencia o grau de verdor da vegetação por meio do ganho da banda do vermelho sobre a do infravermelho próximo destacando a vegetação com aspecto mais verde (DUAN et al., 2017), e os valores do intervalo de 0,2 até 1 representam, de forma gradativa, o nível de verdor da vegetação segundo seus padrões saúde (SILVA; BAPTISTA, 2015).

#### Normalized Difference Infrared Index (NDII)

O “Normalized Difference Infrared Index” – NDII explica a umidade do dossel das árvores por meio de uma matemática de bandas similar ao NDVI, porém, nesse caso se utilizem as camadas de informação do NIR em conjunto com o SWIR de 1,60  $\mu\text{m}$  (HARDISKY31 et al., 1983). Para o cálculo do NDII, utilizou-se a Equação 5.

$$NDII = \frac{\rho_{0.85} - \rho_{1.60}}{\rho_{0.85} + \rho_{1.60}} \quad \text{Equação 5}$$

O índice varia de -1 a 1, cujo valores abaixo de 0 indicam que a refletância do NIR é maior que a refletância do SWIR o que pode evidenciar um estresse hídrico da vegetação (SRIWONGSITANON et al., 2016, SRIWONGSITANON et al., 2015).

#### Plant Senescence Reflectance Index (PSRI)

O “Plant Senescence Reflectance Index” – PSRI mede a senescência e saúde da vegetação por meio da dinâmica de pigmentação influenciada pela a química da planta a qual produz diferentes respostas espectrais (MERZLYAK et al., 1999).

O índice demonstra a sensibilidade da clorofila em relação aos carotenoides, e valores negativos representam a malha vegetal verde com alta composição de clorofila, o intervalo de -0,1 a 0,2 indica o início do estágio de envelhecimento e os intervalos finais indicam o estágio final de senescência do dossel, logo, é uma análise contrária da escala numérica, se comparado aos outros índices. A Equação 6 demonstra o cálculo do PSRI.

$$PSRI = \frac{\rho_{0.65} - \rho_{0.45}}{\rho_{0.75}} \quad \text{Equação 6}$$

#### Normalized Burn Ratio (NBR)








O “Normalized Burn Ratio” – NBR realça as áreas queimadas (KEY; BENSON, 1999; KEY; BENSON, 2006), por meio de uma matemática de bandas similar aos índices anteriores e pode ainda servir de base para outro cálculo que é o “Differenced Normalized Burn Ratio” – dNBR para os períodos pré- e pós-fogo avaliando com mais precisão a severidade do evento (ROY et al., 2006). A Equação 7 e Equação 8 demonstram como foram obtidos os dados referentes às poligonais dos eventos de fogo.

$$NBR = \frac{\rho_{0.85} - \rho_{2.20}}{\rho_{0.85} + \rho_{2.20}} \quad \text{Equação 7}$$

$$dNBR = NBR_{\text{pré-fogo}} - NBR_{\text{pós-fogo}} \quad \text{Equação 8}$$

A Tabela 1 demonstra os intervalos considerados por Miller e Thode (2006), considerando o “Differenced Normalized Burn Ratio” de Roy et al. (2006).

**Tabela 1 – Intervalos do dNBR**

| Nível de severidade       | Intervalo   | Cor   |
|---------------------------|-------------|---|
| Alta rebrota              | -500 a -250 |  |
| Baixa rebrota             | -249 a -100 |  |
| Não queimada              | -99 a 100   |  |
| Baixa severidade          | 101 a 270   |  |
| Severidade moderada baixa | 271 a 440   |  |
| Severidade moderada alta  | 441 a 600   |  |
| Alta severidade           | 661 a 1.300 |  |

Fonte: Miller e Thode (2006). Adaptado pelos autores.

A delimitação das regiões queimadas se deu a partir das regiões consideradas queimadas, ou seja, a partir do valor de 101.

### *Determinação do limiar crítico*

Por meio da máscara de severidade de queimada, obtida pelo dNBR, foi possível segregar as regiões de interesse para a extração dos valores dos pixels. Para cada centroide do pixel foram extraídos os valores de: NDVI, NDII e PSRI. Os valores de PSRI, NDVI, NDII e severidade da queimada são obtidos pelos cálculos dos índices espectrais da metodologia. Os valores extraídos foram submetidos a cálculos estatísticos de média, para cada evento.

Esses valores serviram para determinar a média geral do período analisado, determinando quantitativamente o valor que representa o início de estágio de criticidade a ocorrência de incêndios.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### *Determinação dos períodos de evento*

Foram determinados 6 períodos de ocorrência de fogo, sendo esses nomeados de Evento 1, Evento 2, Evento 3, Evento 4, Evento 5 e Evento 6. As datas das imagens estão dispostas na Tabela 2.

**Tabela 2 – Data das imagens dos eventos**

| Evento   | Pré-fogo   | Pós-fogo   |
|----------|------------|------------|
| Evento 1 | 11/08/2017 | 15/09/2017 |
| Evento 2 | 26/08/2018 | 10/09/2018 |
| Evento 3 | 13/05/2019 | 12/07/2019 |
| Evento 4 | 02/04/2020 | 12/05/2020 |
| Evento 5 | 05/08/2021 | 09/09/2021 |
| Evento 6 | 02/04/2022 | 02/05/2022 |

Fonte: Os autores (2022).

### *Filtragem espacial das cenas*

A filtragem por meio das máscaras juntamente com o processo de “buffer” mostrou resultado bastante satisfatório. Foi possível calcular a máscara geral para cada evento, a partir das máscaras pré- e pós-fogo.

O produto “Sentinel Cloud Probability” mostrou excelente grau de identificação de nuvens, ainda que utilizando o limiar de 50% (recomendado para uma seleção mais homogênea do produto).

O produto desenvolvido com os conhecimentos de Magno et al. (2021) proporciona, dentro do limiar de interesse, excelente precisão na seleção de regiões sombreadas. Conforme encontrado em Magno et al. (2021), as regiões sombreadas puderam ser identificadas, registrando o comportamento espectral do limiar seco e molhado.

O índice NDWI mostrou grande eficiência para identificação de corpos maciços de água, com os limiares estabelecidos. A literatura de Kaplan e Advan (2017) recomenda, para o



Sentinel-2, o valor de 0.1, o qual foi utilizado no processamento.

Foi possível observar, assim como em Kaplan e Advan (2017), que regiões montanhosas que produziram extensões foram identificadas erroneamente, indicando regiões sombreadas ou de material escuro.

Corroborando com as ideias de Milczarek et al. (2017), com o SWM foi possível discretizar e especializar a superfície de água com alto grau de precisão, permitindo também a identificação de pequenos corpos d'água e rios de pequeno comprimento de borda.

Foi observado que os índices de água possuem dificuldades para diferenciar corpos

d'água submetidos a processos de eutrofização, devido a presença de material biológico na estrutura na água, bem como a dinâmica da superfície d'água pode gerar uma propensão a fenômenos de reflexão especulares, que é a reflexão acentuada da incidência de raios solares, prejudicando o reconhecimento da superfície d'água como sendo corpo hídrico.

A Figura 5 demonstra como o processo identificou os materiais que deveriam ser removidos da cena. É possível observar que a maior parte do material não desejado para o processamento foi discretizado, e o processo de "buffer" permitiu tratar a região de transição de pixel.

Figura 5 – Demonstração das máscaras



Fonte: Os autores (2022).

Assim como observado em Santos et al. (2023), o uso de máscaras reduziu a confusão e a classificação de pixels não pertencente a classe de vegetação e queimada, que estavam sendo analisados no estudo. A cobertura e uso de classificação de solo exposto, mancha urbana e água, a exemplos, foram bem caracterizadas e segregadas da classificação automática de extração dos valores dos índices.

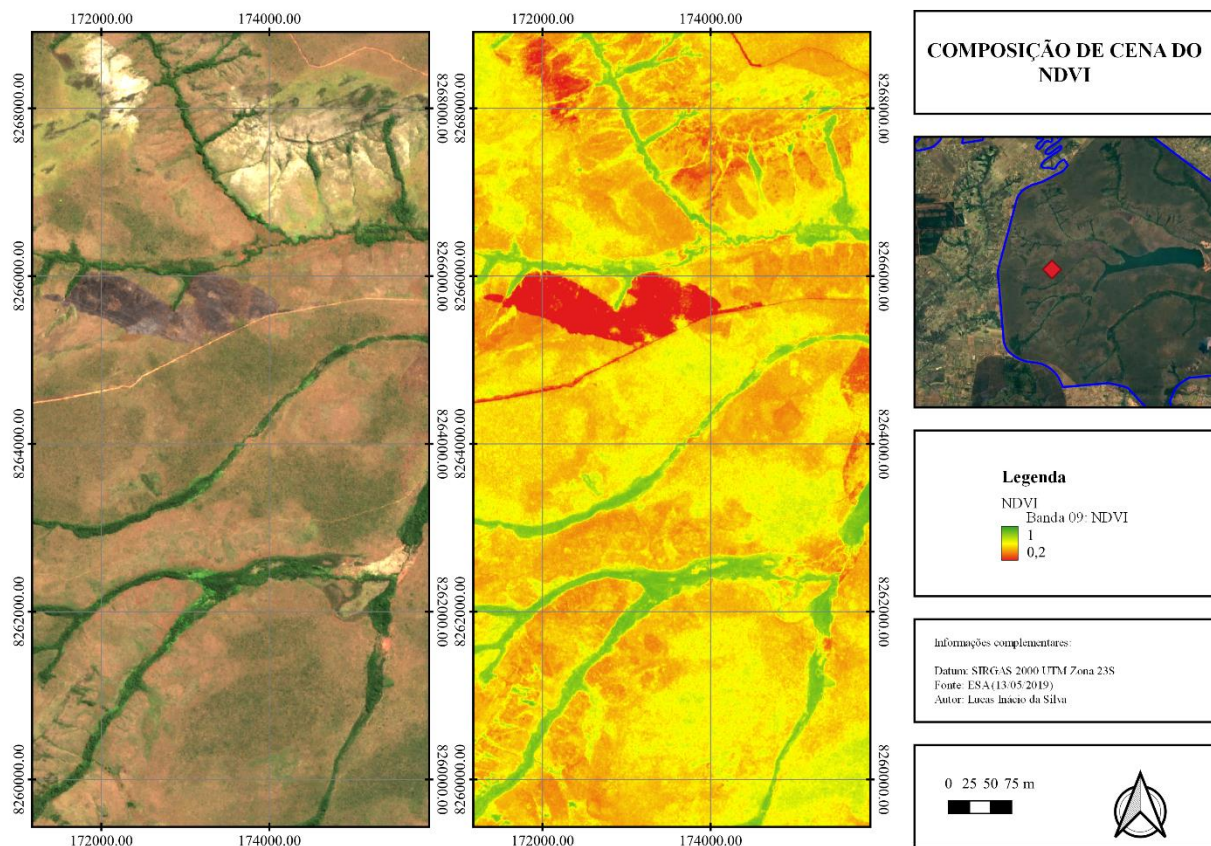
### Índices Espectrais

Serão demonstrados os resultados obtidos com os índices espectrais explicitados na metodologia da pesquisa.

### *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*

O índice NDVI pôde ser calculado para todo os períodos estudados, e no geral, apresentou comportamento condizente com os objetos da pesquisa. O índice apresentou comportamento problemático nos períodos de estiagem, pois a ausência de chuva gerou grande estresse hídrico na vegetação, prejudicando a atividade fotossintética. A Figura 6 mostra o resultado de cálculo do índice.

Figura 6 – Exemplo de NDVI calculado



Fonte: EUROPEAN SPACE AGENCE (s.d.).

Baptista et al. (2018) e Bento-Gonçalves et al. (2019) encontraram valores de média 0,889. Esse valor é considerado muito alto em se tratando de verdor (considerando contextos climáticos e de vegetação diferentes), e por si só não condiciona a região a suscetibilidade a incêndios. A presente pesquisa encontrou valores próximos à 0,582. Esse valor já indica um alerta ao grau de estresse, visto que o limiar aceitável para o índice é [0,2, 1,0].

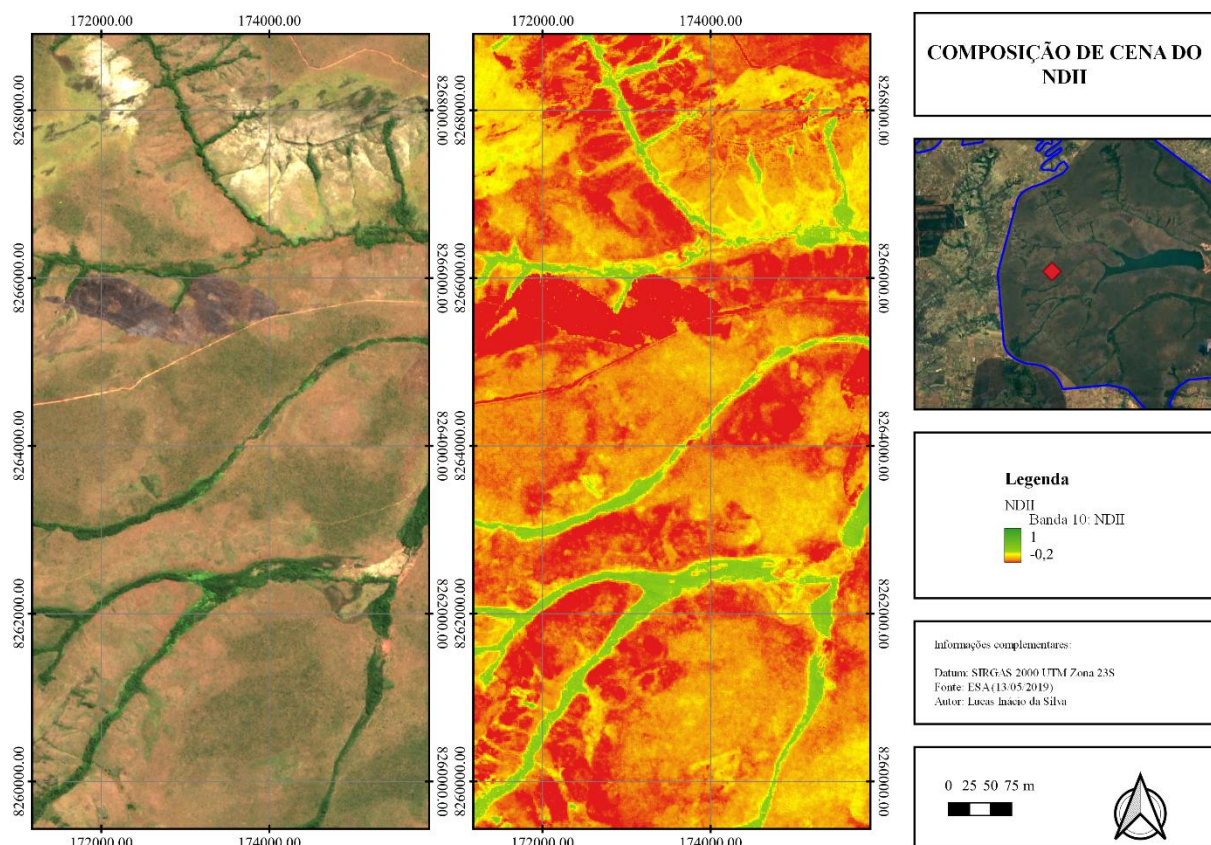
Os valores encontrados para esse índice possuíam alto grau de amplitude, indicando um comportamento heterogêneo da vegetação que queimou, ou seja, regiões com baixas e altas taxas de verdor queimaram. É difícil dizer que o

NDVI possui grande impacto na determinação do potencial combustível da vegetação.

### *Normalized Difference Infrared Index (NDII)*

O índice NDII pôde ser calculado para todo os períodos estudados, e no geral, apresentou comportamento condizente com os objetos da pesquisa. O índice apresentou grande susceptibilidade aos períodos de estiagem, gerando grande superestimação da condição crítica da vegetação, principalmente as vegetações de baixo e médio porte. A Figura 7 mostra o resultado de cálculo do índice.

Figura 7 – Exemplo de NDII calculado



Fonte: EUROPEAN SPACE AGENCE (s.d.).

Baptista et al. (2018) e Bento-Gonçalves et al. (2019) encontraram, para Portugal, os valores médios de 0,35 e os da presente pesquisa encontrou-se valores na média de 0.014. O valor encontrado indica que há um valor de média próximo ao limiar do estresse hídrico da vegetação, segundo Sriwongsitanon et al. (2015).

Conforme Baptista et al. (2018), espera-se que as regiões queimadas apresentem menor umidade em relação as áreas não queimadas. Os valores do NDII apresentaram menor dispersão que os do NDVI, indicando que os pixels das regiões queimadas apresentam certo grau de semelhança entre si, quando se contextualiza o potencial combustível. É possível que regiões com alto teor de verdor também queimem, porém espera-se que regiões com alto teor de

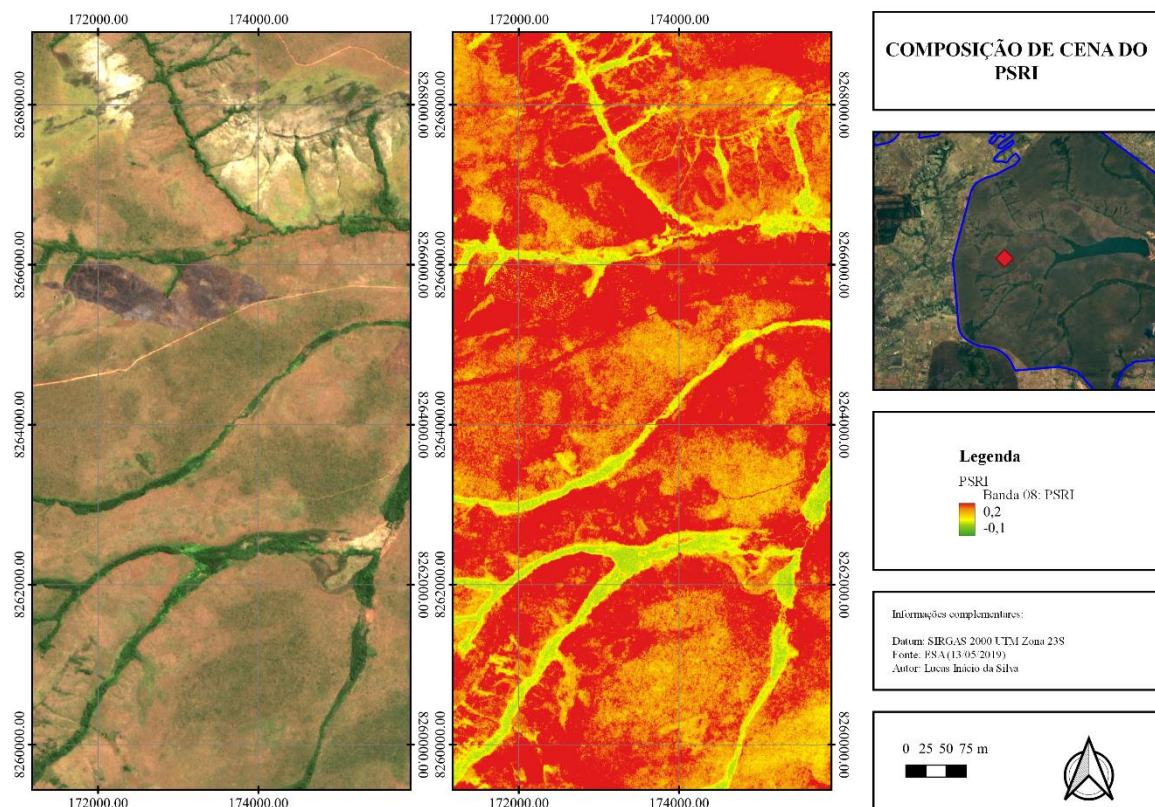
umidade queimem menos e sejam mais persistentes a passagem das chamas.

Observado também por Santos et al. (2023), as cicatrizes de queimadas, por vezes, se confundem com superfícies de água. A técnica utilizada por Santos et al. (2023) envolve aprendizado de máquina, e a utilizada na presente pesquisa envolve a combinação de máscara de identificação de superfícies de água, para remove-las da imagem a ser analisada.

### *Plant Scenescence Reflectance Index (PSRI)*

O índice PSRI pôde ser calculado para todo os períodos estudados, e no geral, apresentou comportamento condizente com os objetos da pesquisa, conforme observado da Figura 8.

Figura 8 – Exemplo de PSRI calculado



Fonte: EUROPEAN SPACE AGENCE (s.d.).

Observou-se uma tendência de média elevada dos valores relacionados ao PSRI nas regiões que queimaram, indicando que essas regiões apresentavam certo grau de senescência. Baptista et al. (2018) e Bento-Gonçalves et al. (2019) encontraram valores de média 0,26 nas regiões queimadas analisadas em sua pesquisa. Esse valor encontra-se dentro da região considerada de vegetação senescente.

Os valores extraídos na presente pesquisa indicavam médias próximos ao intervalo de início de estágio de senescência, o que abarca o intervalo [0.1, 0.2].

### *Normalized Burn Ratio (NBR)*

O NBR foi calculado nas imagens pré- e pós-fogo, permitindo o cálculo do dNBR para cada evento. O dNBR serviu para criação e extração automática dos polígonos das áreas queimadas. Dentro desses polígonos, foram extraídos os valores dos pixels, necessários para os cálculos estatísticos.

Embora se trate de regiões diferentes, observou-se em Santos et al. (2023) o NBR mostrou bastante eficiência na identificação de regiões queimadas por anomalia térmica, bem como sugere que tal índice representa a melhor

proposta para análises temporais, envolvendo anomalias térmicas. Foi possível identificar com algo grau de precisão as regiões queimadas, inclusive na análise temporal, utilizando o mesmo limiar proposto para o índice.

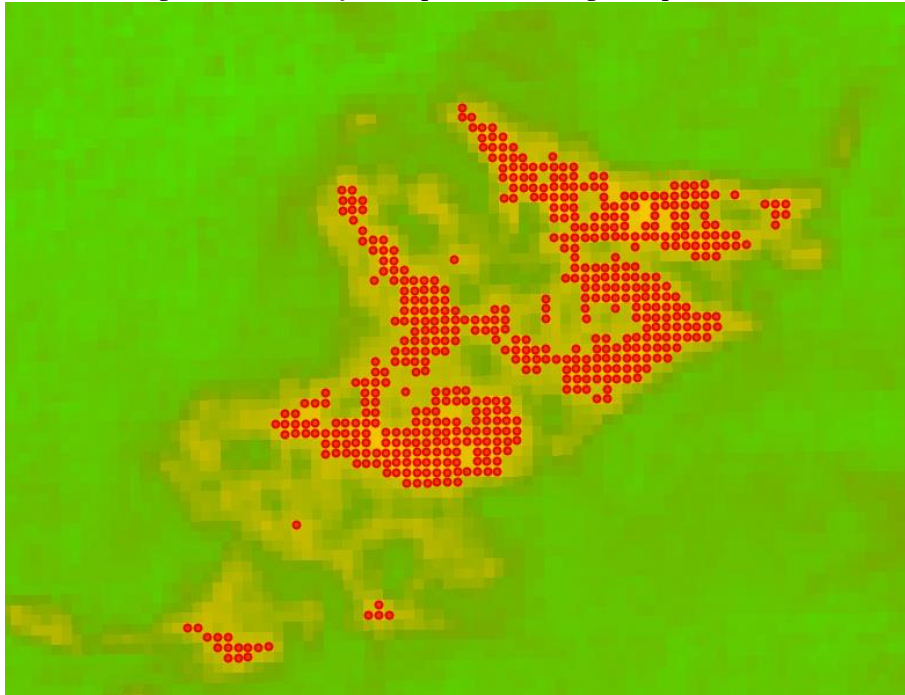
O cálculo do dNBR e do RdNBR foram realizados, a partir do NBR. Observou-se que o dNBR mostrou-se bastante eficiente para determinação da máscara da região queimada, porém, quando segregado nas classes de severidade mostrou-se um certo grau homogêneo de classificação das classes de severidade, e o RdNBR superestimou tais intervalos, identificando e mesclando as classes de “moderada” e “alta severidade”, observado nos incêndios de Gerais Vieira, Mucugê e Gerais Machobongo em Santos et al. (2020).

Tendo dNBR apresentado melhor capacidade de separar as severidades, principalmente utilizado em vegetações homogêneas, foi utilizado a máscara deste índice, discretizando as regiões queimadas das não queimadas.

### *Determinação do limiar crítico*

O polígono do dNBR permitiu a extração dos valores, conforme demonstrado na Figura 9.

Figura 9 – Extração de pontos nas regiões queimadas



Fonte: Os autores (2022).

Extraíu-se da plataforma GEE 6 tabelas, conforme exemplificado na Tabela 3. Cada tabela refere-se à um evento analisado, sendo

assim, foi possível realizar médias estatísticas para os 6 eventos.

**Tabela 3** – Trecho da massa de dados extraído

| Ponto | NDII  | NDVI  | PSRI   | Severidade |
|-------|-------|-------|--------|------------|
| 1     | 0,189 | 0,714 | -0,086 | 459        |
| 2     | 0,194 | 0,721 | -0,095 | 471        |
| 3     | 0,180 | 0,707 | -0,081 | 474        |
| 4     | 0,185 | 0,716 | -0,089 | 456        |
| 5     | 0,124 | 0,617 | -0,081 | 460        |

Fonte: Os autores (2022).

Para a determinação do limiar crítico geral, optou-se por realizar a média dos valores obtidos nos 6 eventos. A demonstra sistematicamente os

valores calculados na pesquisa, para cada ano, bem como a sugestão de média final.

**Tabela 4** – Sistematização dos valores obtidos

| <b>Evento</b>         | <b>NDVI</b>       | <b>NDII</b>       | <b>PSRI</b>       | <b>Pontos Extraídos</b> |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
| <b>Evento 1</b>       | 0,416             | -0,024            | 0.124             | 98.095                  |
| <b>Evento 2</b>       | 0.504             | 0.024             | 0.140             | 119                     |
| <b>Evento 3</b>       | 0,646             | 0.017             | -0,033            | 68.272                  |
| <b>Evento 4</b>       | 0,646             | 0,023             | -0,089            | 33.968                  |
| <b>Evento 5</b>       | 0,670             | 0,050             | 0,093             | 81.928                  |
| <b>Evento 6</b>       | 0.612             | 0.000             | 0.102             | 72.950                  |
| <b>Limiar Crítico</b> | <b>&lt;=0.580</b> | <b>&lt;=0.015</b> | <b>&gt;=0.150</b> | -                       |

Fonte: Os autores (2022).

Os valores supracitados apresentam um alto grau de coerência, pois nos estudos de Baptista et al. (2018) e Bento-Gonçalves et al. (2019) encontrou-se as médias, para as regiões queimadas, de 0,26 para o PSRI, 0.85 para o NDVI e 0.35 para o NDII.

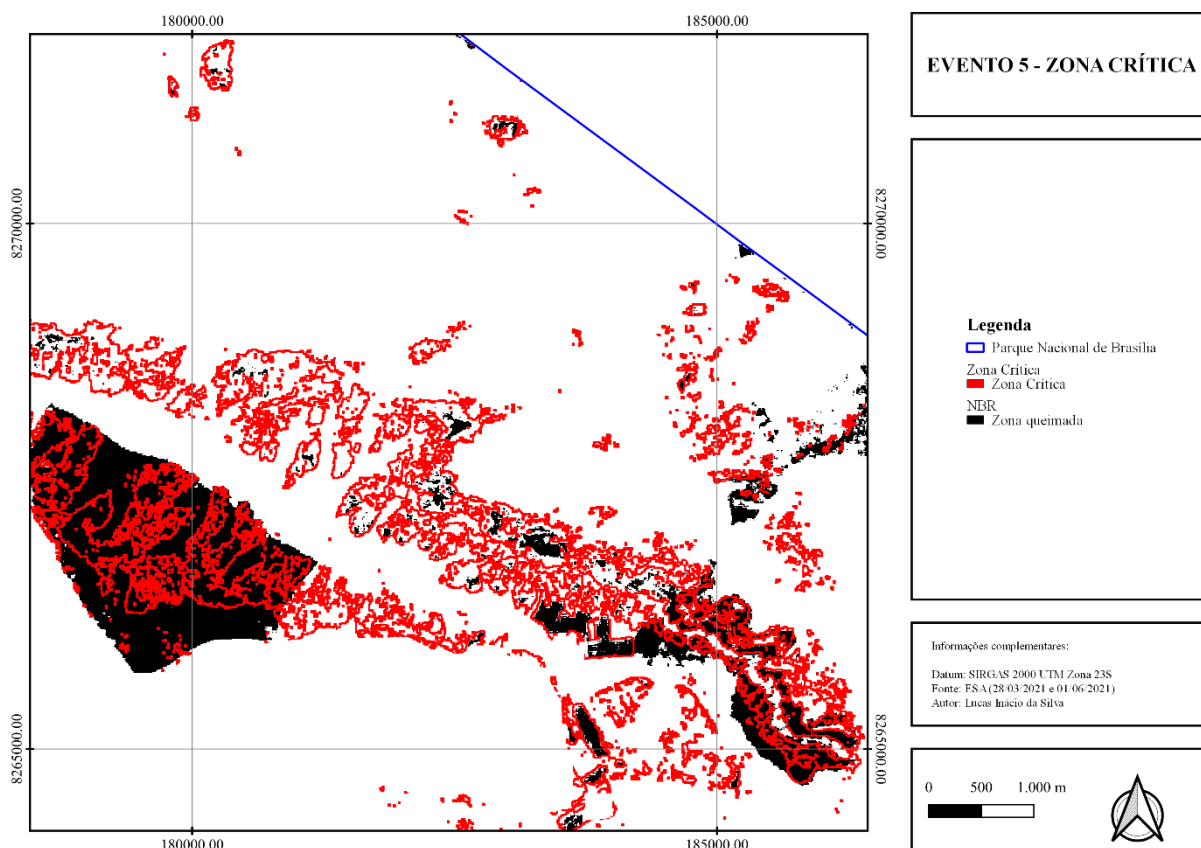
Há de salientar que o contexto climático e de vegetação da região de estudo de ambas pesquisas é completamente diferente. A diferença dos valores não invalida a metodologia aplicada, visto que os valores médios encontrados demonstram uma perspectiva um pouco mais pessimista frente ao cenário encontrado por Baptista et al. (2018) e Bento-Gonçalves et al. (2019).

Assim como observado em Santos et al. (2023), os valores de verdor apresentam elevados números, nas temporadas de chuva. Os valores sofrem mudanças radicais após os eventos de fogo, e indicam, antes da ocorrência

do evento, a susceptibilidade a ocorrência de incêndios. Embora Santos et al. (2023) apresente uma metodologia bem mais refinada, quando ao uso de técnicas de aprendizado de máquina, a essência da pesquisa se aproxima com a do presente artigo, visto que são temáticas bastante relacionadas e com diversos subprodutos, tais como índices espectrais, utilizados em ambos.

Sendo assim, foram manipuladas as imagens dos períodos anteriores ao fogo dos índices espectrais supracitados, para que isolem os valores presentes no intervalo crítico encontrado. Uma nova imagem foi gerada, para cada ano, contendo a sobreposição de cada intervalo crítico do ano com os pixels queimados da imagem após o período do fogo. A Figura 10 demonstra um exemplo de cálculo das regiões com potencial combustível no Evento 5.

Figura 10 – Zonas críticas no Evento 5



Fonte: EUROPEAN SPACE AGENCE (s.d.).

Observou-se então que a indicação das zonas críticas geradas pela combinação dos índices filtrados pelos limiares mostrou satisfatória conformidade com as regiões que realmente queimaram, permitindo assim o mapeamento de regiões com potencial combustível, corroborando a proposta elencada por Baptista et al. (2018).

Contudo, há de salientar que a mera espacialização dessas regiões pode apresentar problemas tais como: indicação de zonas inertes como potencial combustível, indicação de zonas já queimadas como potencial combustível e superestimação das zonas críticas.

As zonas inertes, tais como solo exposto, ficam evidenciadas pelo método devido ao fato de apresentar comportamento espectral propício em cada índice. Isso se deve pela valoração desfavorável que recebe nos índices graças ao tipo de material que está sendo observado, porém é necessário ter o entendimento de que, embora essas zonas sejam críticas, não

apresentam riscos de propagação de incêndios, tais como banco de areia ou brita por exemplo.

As regiões queimadas também apresentam problemas nas imagens, pois há valoração desfavorável nos índices. Essa valoração deve-se ao fato de que são regiões que não apresentam valores de verdor e umidade compatíveis com estruturas vegetais e os valores de senescência sofrem uma interpretação errônea, gerada pela cicatriz da queimada.

Escolheu-se os anos de 2017, 2019, 2021 e 2022 para realizar uma análise quantitativa espacial utilizando os dados obtidos pelos limiares, pois foram os períodos com maiores quantidades de dados extraídos. A Tabela 5 demonstra, em hectares, a análise sob a ótica da área realmente queimada (Área Queimada), a área crítica obtida pelos limiares (Área Crítica) e a área crítica efetivamente queimada (Área Efetiva), obtida pela intersecção da área queimada com a área crítica.

**Tabela 5** – Análise quantitativa das zonas críticas

| Análise                          | 2017     | 2019      | 2021     | 2022     |
|----------------------------------|----------|-----------|----------|----------|
| Área Queimada                    | 3357.355 | 692.616   | 865.019  | 797.285  |
| Área Crítica                     | 1742.854 | 19176.207 | 2104.648 | 2411.144 |
| Área Efetiva                     | 9.814    | 671.423   | 4.682    | 14.83    |
| (Área Efetiva) / (Área Queimada) | 0.56%    | 3.50%     | 0.22%    | 0.62%    |
| (Área Efetiva) / (Área Crítica)  | 0.29%    | 96.94%    | 0.54%    | 1.86%    |

Fonte: Os autores (2022).

Observa-se a relação “(Área Efetiva) / (Área Queimada)”, que indica a porcentagem da área que efetivamente queimou, aquela que está dentro da região crítica e queimada ao mesmo tempo, e a “(Área Efetiva) / (Área Crítica)”, indicando o quanto da região crítica realmente queimou. O ano de 2019 conseguiu identificar bem as regiões críticas, pois as manchas de queimadas se localizaram em grande parte dentro das regiões críticas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se, que a hipótese previamente lançada foi confirmada, ou seja, é possível estipular limiares físicos que determinar o intervalo de criticidade a incêndios por meio de índices espectrais. As regiões queimadas apresentavam um padrão de valores nos índices, que explicavam a criticidade da região.

O verdor apresentou valores um pouco mais variados, indicando que a senescência e a umidade são fatores de maior peso para determinação da criticidade. A umidade das regiões queimadas também estava no limiar do início do intervalo de estresse hídrico. Observou-se também que a senescência média da região queimada se concentra na região de valores próximo ao intervalo que se considera o início do estágio de senescência. A vegetação que queimou apresentava verdor variado, porém apresentava umidade e senescência favoráveis à criticidade à incêndios.

Sugere-se o aprofundamento do estudo da determinação do limiar crítico à ocorrência de incêndios, procurando estabelecer modelagens matemáticas que visem a redução dos efeitos negativos encontrados nos resultados da espacialização das regiões críticas.

Sugere-se o aprofundamento da plataforma GEE, com as técnicas dessa pesquisa, visando desenvolver um sistema de monitoramento de regiões potencial combustível, utilizando plataformas livres e acervo de dados gratuitos.

## REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, G. M. M., BENTO-GONÇALVES, A., VIEIRA, A. **Avaliação das condições de verdor, umidade e de senescência da vegetação queimada no incêndio de braga, portugal, em outubro de 2017**. In: II Encontro Luso-Afro-Americano de Geografia Física e Ambiente - Desafios para Afirmar a Lusofonia na Geografia Física e Ambiente, 2018, Guimarães, Portugal. Anais (on-line). Guimarães: CEGOT-UMinho, Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade do Minho, 2018. Disponível em: [http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/60165/1/II\\_ELAAGFA\\_Baptista\\_et\\_al.pdf](http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/60165/1/II_ELAAGFA_Baptista_et_al.pdf). Acesso em: 22 abr. 2020.
- BARMPOUTIS, P.; PAPAIONNOU, P.; DIMITROPOULOS, K.; GRAMMALIDIS, N. A review on early forest fire detection systems using optical remote sensing. **Sensors**, v. 20, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20226442>
- BENTO-GONÇALVES. **Incêndios rurais – O triste fado português?** Fundação Francisco Manoel dos Santos, 2022. Disponível em: <https://www.ffms.pt/pt-pt/atualmentes/incendios-rurais-o-triste-fado-ortugues?fbclid=IwAR2hstJhcdvec8oAhMs2vG1bZp2J2DDmoFlMorSIKrCacWCywtlj7QqrviY>, acessado em 30 mar. 2023.
- BENTO-GONÇALVES, A.; VIEIRA, A.; BAPTISTA, G. ROCHA, J.; MOURA, SARAH. The 2017 Large wildfire of braga - evaluation of the different conditions of the burned vegetation. **Geo-Eco-Trop**, v. 43, n. 4, p. 627-640, 2019.



- CARELLA, E.; ORUSA, T.; VIANI, A.; MELONI, D.; BORGOGNO-MONDINO, E.; ORUSA, R. An integrated, tentative remote-sensing approach based on ndvi entropy to model canine distemper virus in wildlife and to prompt science-based management policies. **MDPI: Animals**, v. 12, n. 1049, 2022. <https://doi.org/10.3390/ani12081049>
- COLLI, G. R.; VIEIRA, C. R.; DIANESE, J. C. Biodiversity and conservation of the cerrado: recent advances and old challenges. **Biodiversity and Conservation**, v. 29, p. 1465-1475, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10531-020-01967-x>
- DUAN, T.; CHAPMAN, S. C.; GUO, Y.; ZHENG, B. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. **Field Crop Research**, v. 210, p. 71-80, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.025>
- EARTH RESOURCES OBSERVATION AND SCIENCE (EROS) (USA). Washington, United States of America. Washington: EarthExplorer, 2023. 12 imagens de satélite, color. Satélite Sentinel-2, instrumento MSI. Intervalo de tempo: de 05 mai 2016 a 02 mai. 2022. Lat. -15.6669, Long. -47.9997. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 05 nov. 2020
- EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA) (EUROPE). Europe: Copernicus Open Access Hub, s.d., 12 imagens de satélite, color. Satélite Sentinel-2, instrumento MSI. Intervalo de tempo: de 05 mai 2016 a 02 mai. 2022. Lat. -15.6669, Long. -47.9997. Disponível em: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Acesso em: 05 nov. 2022
- FASSNACHT, F. E.; SCHMIDT-RIESE, E.; KATTENBORN, T.; HERNÁNDEZ, J. **Explaining sentinel 2-based dnbr and rdnbr variability with reference data from the bird's eye (uas) perspective**. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, n. 1, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102262>
- FERNÁNDEZ-MANSO, A.; QUINTANO, C. A synergetic approach to burned area mapping using maximum entropy modeling trained with hyperspectral data and viirs hotspots. **Remote Sensing**, v. 12, n. 858, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12050858>
- GEOPORTAL (Brasil). Brasília, Distrito Federal. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação, Brasília: dados vetoriais de Cidades Administrativas, Vias Rodoviárias e Unidades de Conservação, 2022. Disponível em: <https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/geoportal/>. Acesso em: 02 fev. 2022
- GOOGLE (USA). Google Earth Engine, 2023. 12 imagens de satélite, color. Satélite Sentinel-2, instrumento MSI. Intervalo de tempo: de 05 mai 2016 a 02 mai. 2022. Lat. -15.6669, Long. -47.9997. Disponível em: <https://code.earthengine.google.com/>. Acesso em: 30 jan. 2023
- GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. GEE: planetary-scale geospatial analysis for everyone. Elsevier: **Remote Sensing Environment**, v.202, p. 18-27, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- HARDISKY, M.A., V. KLEMAS, and R.M. SMART. The Influences of Soil Salinity, Growth Form, and Leaf Moisture on the Spectral Reflectance of Spartina Alterniflora Canopies. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 49, p. 77-83, 1983.
- HOFMANN, G. S.; CARDOSO, M. C.; ALVES, R. J. V.; WEBER, E. J.; ALEXANDRE A. B.; TOLEDO, P. M.; PONTUAL, F. B.; SALLES, L. O.; HASENACK, H.; CORDEIRO, J. L. P.; AQUINO, F. E.; OLIVEIRA, L. F. B. The brazilian cerrado is becoming hotter and drier. **Global Change Biology**, v. 27, p. 4060-4073, 2021. <https://doi.org/10.1111/gcb.15712>
- IBGE (Brasil). Brasília, Distrito Federal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Brasília: dados vetoriais de biomas brasileiros. Disponível em: <https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/geoportal/>. Acesso em: 02 fev. 2022
- KAPLAN, G.; ADVAN, U. Object-based water body extraction model using Sentinel-2 satellite imagery. European Journal of Remote Sensing, v. 50, n.1, p. 137-143, 2017. <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1297540>
- KEY, C. H.; BENSON, N. C. **Landscape Assessment: Sampling and Analysis Methods. Landscape Assessment: Sampling and analysis Methods**, 2006.
- KEY, C. H.; BENSON, N. C. **Measuring and remote sensing of burn severity. Landscape Assessment: Sampling and analysis Methods**, 1999.
- MAGNO, R.; ROCHI, L.; DANIELLI, R.; MATESE, A.; GENNARO, S. F. D.; CHEN, C.; SON, N.; TOSCANO, P. Agrosadow: a new sentinel-2 cloud shadow detection tool for precision agriculture. **Remote Sensing**, v. 13, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13061219>
- MAPBIOMAS (Brasil). MAPBIOMAS: Dados de Mapas das Coleções – Cobertura e Uso do Solo. Disponível em: <https://mapbiomas.org/download>. Acesso em: 02 fev. 2020.
- MARCYIN. **MarcYin/SIAC: for doi**. Belgium: Bruxelles, 2019a.
- MARCYIN. **MarcYin/SIAC\_GEE: To Publish the Code**. Belgium: Bruxelles, 2019b.
- McFEETERS, S.K. **The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features**. International Journal of Remote Sensing, p. 1425-1432, 1996. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

- MERZLYAK, M. N.; GITELSON, A. A.; CHIVKUNOVA, Olga B.; RAKITIN, Victor Yu. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia Plantarum**, v. 106, p. 135-141, 1999. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x>
- MILCZAREK, M.; ROBAK, A. Sentinel Water Mask (SWM) – new index for water detection on Sentinel-2 images. **Conference: 7<sup>th</sup> Advanced Training Course on Land Remote Sensing**, 2017.
- MILLER, J. D.; THODE, A. E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta normalized burn ratio (dnbr). **Remote Sensing**, v. 109, p. 66-80, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006>
- NURSAPUTRA, M.; LAREKENG, S. H.; NASRI; HAMZAH, A. S. **The ndvi algorithm utilization on the GEE platform to monitor changes in forest density in mining areas**. 2nd Biennial Conference of Tropical Biodiversity: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/886/1/012100>
- RIBEIRO, N.; RUECKER, G.; GOVENDER, N.; MACANDZA, V.; PAIS, A.; MACHAVA, D.; CHAUQUE, A.; LISBOA, S. N.; BANDEIRA, R. The influence off fire frequency on the structure and botanical composition of savanna ecosystems. **Ecology and Evolution**, v. 9, p. 8253-8264, 2019. <https://doi.org/10.1002/ece3.5400>
- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H., SCHELL, J.A.; DEERING, D.W., 1974. **Monitoring vegetation systems in the great plains with erts**. In: Proceeding Of Erts-1 Symposium. Anais ... NASA, United States.
- ROY, D. P.; BOSCHETTI, L.; TRIGG, S. N. Remote sensing of fire severity: assessing the performance of the normalized burn ratio. **Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 3, n. 1, 2006. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.858485>
- SANTOS, S. M. B.; BENTO-GONÇALVES, A.; FRANCA-ROCHA, W.; BAPTISTA, G. **Assessment of Burned Forest Area Severity and Postfire Regrowth in Chapada Diamantina National Park (Bahia, Brazil) Using dNBR and RdNBR Spectral Indices**. **Geosciences**, v. 10, n. 106, 2020. <https://doi.org/10.3390/geosciences10030106>
- SANTOS, S. M. B.; DUBERGER, S. G.; BENTO-GONÇALVES, A.; FRANCA-ROCHA, W.; VIEIRA, A.; TEIXEIRA, G. **Remote Sensing Applications for Mapping Large Wildfires Based on Machine Learning and Time Series in Northwestern Portugal**. **Fire**, v. 6, n. 43, 2023. <https://doi.org/10.3390/fire6020043>
- SILVA, S. L.; BAPTISTA, G. M. M. Análise do grau de severidade de áreas queimadas na estação ecológica de águas emendadas por meio de dados do landsat 8. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 2, p. 431-438, 2015. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.2.p431-438>
- SRIWONGSITANON, N.; GAO, H.; SAVENIJE, H. H. G.; MAEKAN, E.; SAENGSAWANG, S.; THIANPOPIRUNG, S. Comparing the normalized difference infrared index (ndii) with root zone storage in a lumped conceptual model. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, p. 3361-3377, 2016. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3361-2016>
- SRIWONGSITANON, N.; GAO, H.; SAVENIJE, H. H. G.; MAEKAN, E.; SAENGSAWANG, S.; THIANPOPIRUNG, S. The Normalized Difference Infrared Index (NDII) as a proxy for soil moisture storage in hydrological modelling. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, 2015. <https://doi.org/10.5194/hessd-12-8419-2015>
- VERNOOIJ, R.; GIONGO, M.; BORGES, M. A.; COSTA, M. M.; BARADAS, A. C. S.; WERF, G. R. V. D. Intraseasonal variability of greenhouse gas emission factors from biomass burning in the brazilian cerrado. **Biogeosciences**, v. 1, p. 1375-1393, 2021. <https://doi.org/10.5194/bg-18-1375-2021>

## CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Gustavo Macedo de Mello Baptista concebeu os estudos com sua linha de pesquisa sobremétricas de queimada. Diversos estudos prévios realizados por ele constataram fortes evidências na discretização das regiões queimadas das não queimadas. Lucas Inácio da Silva concebeu a plataforma para análise em larga escala da metodologia proposta por Gustavo Macedo de Mello Baptista, tendo também realizado as validações necessárias em sua área de estudo. A plataforma GEE foi utilizada sob os conhecimentos de programação de Lucas Inácio da Silva, que sob orientação de Gustavo Macedo de Mello Baptista, criou a plataforma de análise de limiares críticos.



Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.