

## AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ÍNDICES ESPECTRAIS PARA DETECÇÃO DE ÁREAS QUEIMADAS NO MUNICÍPIO DE UBERABA (MG)

**Júlia Fontanesi Sousa**

Engenheira ambiental pela Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil<sup>1</sup>

[juliafontanezi@gmail.com](mailto:juliafontanezi@gmail.com)

**Renato Farias do Valle Junior**

Doutor em Agronomia, Professor do Instituto Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil<sup>2</sup>

[renato@iftm.edu.br](mailto:renato@iftm.edu.br)

**Elcides Rodrigues da Silva**

Doutor em Agronomia, Professor da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil<sup>1</sup>

[elcides.silva@uftm.edu.br](mailto:elcides.silva@uftm.edu.br)

**Alex Garcez Utsumi**

Doutor em Agronomia, Professor da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil<sup>1</sup>

[alex.utsumi@uftm.edu.br](mailto:alex.utsumi@uftm.edu.br)

**RESUMO:** A elevada recorrência de incêndios no bioma Cerrado, associada a alterações climáticas e práticas agropecuárias intensivas, tem causado impactos severos sobre a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos. O uso de índices espectrais derivados de imagens de satélite tem se mostrado eficaz na identificação de queimadas, embora ainda apresente limitações em áreas agrícolas. Este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho de diferentes índices espectrais na detecção de áreas queimadas no município de Uberaba (MG), Brasil. Foram utilizadas imagens do sensor Sentinel-2A, obtidas por meio da plataforma *Google Earth Engine* (GEE), abrangendo períodos anteriores e posteriores às queimadas registradas em 2022. Foram analisados cinco índices: *Normalized Burn Ratio* (NBR), *Normalized Burn Ratio-SWIR* (NBRSWIR), *Normalized Difference Shortwave Infrared Index* (NDSWIR), *Mid-Infrared Bi-Spectral Index* (MIRBI) e *Normalized Burn Ratio Plus* (NBR+). A acurácia das classificações foi avaliada com base na comparação com um mapa de referência do MapBiomas. Os índices NBRSWIR e MIRBI apresentaram os melhores desempenhos, indicando maior capacidade de reconhecer efetivamente as áreas queimadas e menor ocorrência de falsos positivos. Ainda, o MIRBI detectou 25,37 km<sup>2</sup> de queimadas, sendo um valor próximo ao mapeado pelo MapBiomas (23,25 km<sup>2</sup>). A combinação das bandas 11 e 12 do Sentinel-2A foi determinante para o aprimoramento dos resultados, evidenciando a relevância da região do infravermelho de ondas curtas na identificação de queimadas em paisagens dominadas por cultivos agrícolas. Esses achados reforçam o potencial dos índices baseados nesse intervalo espectral para o monitoramento de incêndios em zonas antropizadas do Cerrado.

**Palavras-Chave:** Sensoriamento remoto; Cerrado; *Google Earth Engine*.

## EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF SPECTRAL INDICES FOR BURNED AREA DETECTION IN THE MUNICIPALITY OF UBERABA (MG)

**ABSTRACT:** The high recurrence of wildfires in the Cerrado biome, associated with climate change and intensive agricultural practices, has caused severe impacts on biodiversity and ecosystem services. The use of spectral indices derived from satellite imagery has proven effective in identifying burn areas, although it still presents limitations in agricultural regions. This study aimed to evaluate the performance of different spectral indices in detecting fire scars in the municipality of Uberaba (MG), Brazil. Images from the Sentinel-2A sensor were used, obtained via the Google Earth Engine (GEE)

<sup>1</sup> Endereço para correspondência: Av. Frei Paulino, 30, Abadia, CEP: 38025-180, Uberaba, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup> Endereço para correspondência: Rua João Batista Ribeiro, 4000, Distrito Industrial II, CEP: 38064-790, Uberaba, Minas Gerais, Brasil.

platform, covering periods before and after the fire events recorded in 2022. Five indices were analyzed: Normalized Burn Ratio (NBR), Normalized Burn Ratio-SWIR (NBRSWIR), Normalized Difference Shortwave Infrared Index (NDSWIR), Mid-Infrared Bi-Spectral Index (MIRBI), and Normalized Burn Ratio Plus (NBR+). Classification accuracy was evaluated based on a comparison with a MapBiomas reference map. The NBRSWIR and MIRBI indices showed the best performance, indicating a greater capacity to influence burned areas and a lower occurrence of false positives. Even so, MIRBI detected 25.37 km<sup>2</sup> of fires, a value close to that mapped by MapBiomas (23.25 km<sup>2</sup>). The combination of Sentinel-2A bands 11 and 12 was crucial for improving the classification results, highlighting the relevance of the shortwave infrared region in identifying burned areas in landscapes dominated by agricultural crops. These findings reinforce the potential of shortwave infrared-based indices for wildfire monitoring in anthropized regions of the Cerrado.

**Keywords:** Remote sensing; Cerrado; Google Earth Engine.

### EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS ÍNDICES ESPECTRALES PARA LA DETECCIÓN DE ÁREAS QUEMADAS EN EL MUNICIPIO DE UBERABA (MG)

**RESUMEN:** La alta recurrencia de incendios en el bioma Cerrado, asociada al cambio climático y a las prácticas agropecuarias intensivas, ha provocado impactos severos sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. El uso de índices espectrales derivados de imágenes satelitales ha demostrado ser eficaz en la identificación de áreas quemadas, aunque aún presenta limitaciones en regiones agrícolas. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño de diferentes índices espectrales en la detección de áreas quemadas en el municipio de Uberaba (MG), Brasil. Se utilizaron imágenes del sensor Sentinel-2A, obtenidas a través de la plataforma Google Earth Engine (GEE), abarcando períodos anteriores y posteriores a los eventos registrados en 2022. Se analizaron cinco índices: Normalized Burn Ratio (NBR), Normalized Burn Ratio-SWIR (NBRSWIR), Normalized Difference Shortwave Infrared Index (NDSWIR), Mid-Infrared Bi-Spectral Index (MIRBI) y Normalized Burn Ratio Plus (NBR+). La precisión de las clasificaciones fue evaluada a partir de la comparación con un mapa de referencia de MapBiomas. Los índices NBRSWIR y MIRBI mostraron el mejor rendimiento, lo que indica una mayor capacidad para influir en las zonas quemadas y una menor incidencia de falsos positivos. Aun así, MIRBI detectó 25,37 km<sup>2</sup> de incendios, un valor cercano al registrado por MapBiomas (23,25 km<sup>2</sup>). La combinación de las bandas 11 y 12 del Sentinel-2A fue determinante para mejorar los resultados, evidenciando la relevancia de la región del infrarrojo de onda corta en la identificación de áreas quemadas en paisajes dominados por cultivos agrícolas. Estos resultados refuerzan el potencial de los índices basados en ese intervalo espectral para el monitoreo de incendios en zonas antropizadas del Cerrado.

**Palabras clave:** Teledetección; Cerrado; Google Earth Engine.

## Introdução

O Cerrado é o segundo bioma brasileiro com maior ocorrência de incêndios florestais (INPE, 2021). Nos últimos anos, observa-se um aumento da frequência e da extensão desses eventos, além de alterações na sazonalidade. Ademais, verifica-se que as mudanças climáticas e as atividades antrópicas têm modificado os regimes de queima, o que pode acarretar repercuções significativas sobre a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos (SOUSA, 2023).

Ao se analisar o Cerrado como um todo, identifica-se que mais de 69% de sua área é afetada por queimadas ao final da estação seca, geralmente provocadas por ações humanas (SOUSA, 2023). No Brasil, o uso do fogo é uma prática recorrente no controle de pragas e na eliminação de resíduos agrícolas (DALDEGAN; ROBERTS; RIBEIRO, 2019). No entanto, essa prática frequentemente assume proporções desastrosas, afetando a vegetação nativa e provocando a mortalidade de animais silvestres e espécies endêmicas. De modo semelhante a outras savanas, os incêndios ocorridos entre agosto e setembro tendem a ser mais intensos, severos e extensos, em razão do acúmulo de material combustível, do clima mais seco e da intensificação dos ventos (SOUSA, 2023).

O município de Uberaba (MG), inserido em zona agrometeorologicamente favorável à cultura da cana-de-açúcar, apresenta elevado grau de ocupação agropecuária, com predominância de cultivos semiperenes e perenes (ALMEIDA; CALIJURI; PINTO, 2013). Contudo, essas áreas concentram as maiores ocorrências de queimadas no município, sendo a cana-de-açúcar o principal vetor de propagação dos focos de calor (PANTALEÃO JÚNIOR; FERREIRA, 2020).

A detecção de áreas queimadas por meio do sensoriamento remoto tem avançado com o uso de técnicas como índices espectrais, inversão da temperatura da superfície, análise de componentes principais, classificação de imagens, redes neurais e análise de mistura espectral (LANEVE *et al.*, 2024). Dentre essas abordagens, os índices espectrais destacam-se por sua simplicidade operacional, baixo custo computacional e elevada eficácia. Dada a singularidade de cada evento de queima, diversos autores propuseram índices específicos para identificar áreas afetadas, avaliar a gravidade dos impactos sobre a vegetação e monitorar sua regeneração, com base em imagens de diferentes sensores orbitais (GERARD *et al.*, 2003; KEY; BENSON, 2006; TRIGG, FLASSE, 2010; LIU *et al.*, 2020; ALCARAS *et al.*, 2022).

Apesar dos avanços, a detecção precisa de áreas queimadas em ambientes agrícolas permanece desafiadora, sobretudo devido à semelhança espectral entre os sinais de fogo e alterações causadas pelas práticas agrícolas (ROTETA *et al.*, 2019). Em períodos como preparo do solo, colheita ou plantio, essas modificações podem mascarar os indícios de fogo, resultando em classificações imprecisas. Tais interferências são agravadas pela rápida regeneração da vegetação e reduzida extensão espacial de muitos focos (BOSCHETTI *et al.*, 2019).

A incerteza na identificação de cicatrizes de queimada impacta diretamente os algoritmos de detecção, reforçando a necessidade do uso de sensores ópticos de média resolução espacial e alta frequência de revisita, como o Sentinel-2. Disponibilizado gratuitamente pelo programa Copernicus da União Europeia, esse sensor oferece resolução de até 10 metros e cobertura multiespectral, incluindo bandas no infravermelho de ondas curtas. Contudo, ainda é subutilizado no mapeamento de incêndios (BOSCHETTI *et al.*, 2019).

Adicionalmente, plataformas de computação em nuvem como o *Google Earth Engine* (GEE) têm facilitado o processamento de grandes volumes de dados orbitais, permitindo análises temporais e espaciais complexas com menor custo operacional (MAHDIANPARI *et al.*, 2018). O GEE integra diferentes sensores orbitais, como Sentinel-2 e Landsat, fornecendo imagens com variada resolução espectral e frequência temporal, o que o torna estratégico para o monitoramento de áreas queimadas, especialmente em regiões agrícolas com elevada dinâmica de uso e cobertura do solo (FRANQUESA; STEHMAN; CHUVIECO, 2022).

Ainda assim, persiste uma lacuna considerável quanto à análise comparativa do desempenho de diferentes índices espectrais aplicados ao bioma Cerrado em ambientes computacionais em nuvem (ARRUDA *et al.*, 2021). Diante desse panorama, o presente estudo tem como objetivo avaliar comparativamente o desempenho de diferentes índices espectrais aplicados à detecção de áreas queimadas no município de Uberaba, utilizando imagens do sensor Sentinel-2A processadas na plataforma *Google Earth Engine*. Para tanto, este trabalho se fundamenta na hipótese de que índices que incorporam bandas do infravermelho de ondas curtas, em especial B11 e B12, apresentam desempenho superior na identificação de áreas queimadas.

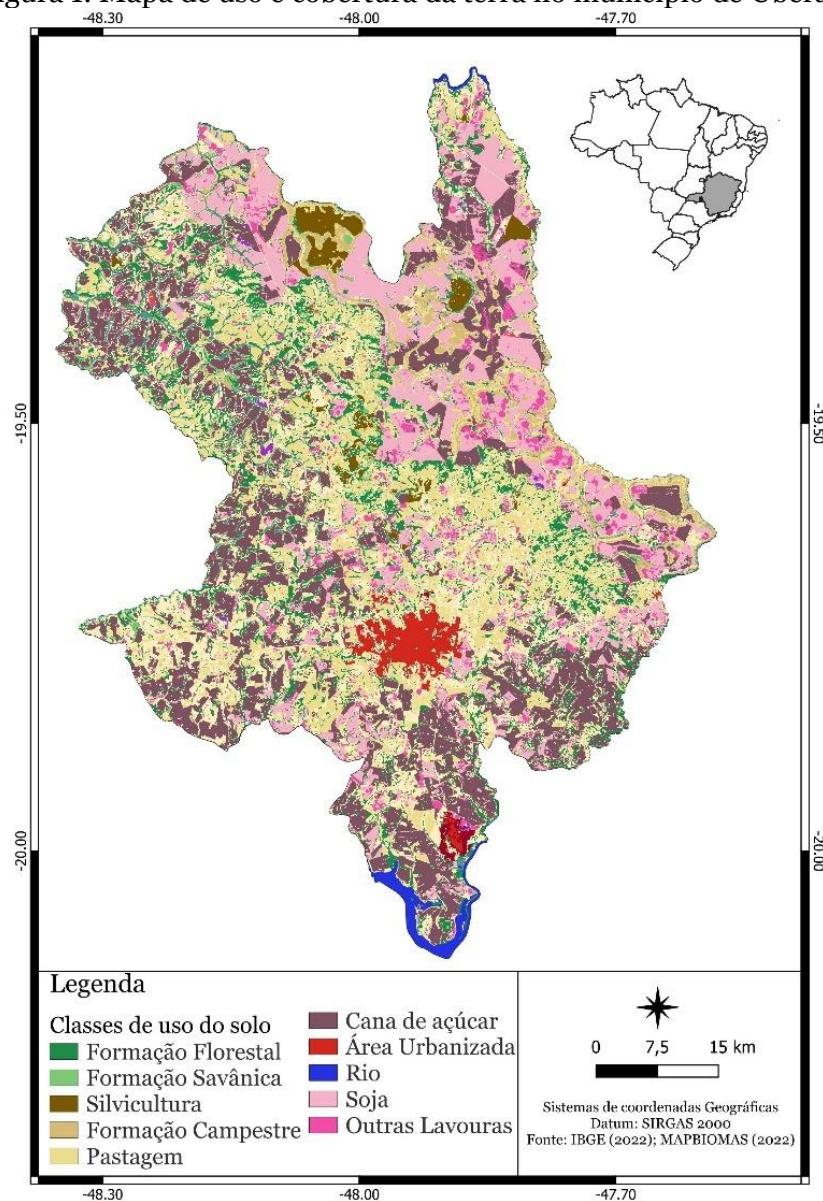
## Material e Métodos

O *Google Earth Engine* foi adotado como plataforma para o processamento das imagens e a análise dos índices espectrais. Essa ferramenta viabiliza o tratamento de grandes volumes de dados orbitais com rapidez, precisão e reproduzibilidade, permitindo análises multitemporais e classificações em larga escala, com menor custo computacional (BREXÓ; MATTOS; SUSZEK, 2023).

## Caracterização da área de estudo

O município de Uberaba está situado na mesorregião do Triângulo Mineiro, no estado de Minas Gerais. Sua área territorial corresponde a 4.523,957 km<sup>2</sup>, com uma população estimada em 337.836 habitantes (IBGE, 2022). Segundo dados do MapBiomass (2022), cerca de 76,59% da superfície municipal é ocupada por cultivos agrícolas e pastagens, o que reflete a intensidade da pressão antrópica sobre a paisagem natural. As principais classes de cobertura do solo (Figura 1) incluem formações savânicas do Cerrado, pastagens manejadas e monoculturas de cana-de-açúcar e soja. O município de Uberaba possui clima tropical sazonal com estação seca bem definida entre os meses de abril e setembro, período no qual se intensificam os registros de focos de calor, com maior ocorrência entre agosto e setembro (PANTALEÃO JÚNIOR; FERREIRA, 2020).

Figura 1: Mapa de uso e cobertura da terra no município de Uberaba



Fonte: Elaborado pelos autores.

## Criação dos índices espectrais

Com o propósito de identificar as áreas afetadas por queimadas, foram criados índices espectrais. Esses são, em geral, simples, seguros e com uma capacidade de resposta rápida (BA *et al.*, 2019). Além disso, os índices permitem extrair com precisão o comportamento espaço-temporal da vegetação, medindo a densidade e o vigor vegetativo no pré e pós-fogo (CHEN *et al.*, 2016). A aquisição das imagens orbitais foi realizada por meio da plataforma *Google Earth Engine*, utilizando a coleção de dados do sensor Sentinel-2A. Foram selecionadas duas datas-alvo: uma pré-queimada (1º a 15 de julho de 2022) e outra pós-queimada (9 a 15 de setembro de 2022). Para garantir a qualidade radiométrica das imagens, foi aplicado um filtro para cobertura máxima de 5% de nuvens, conforme metadados da coleção, e as imagens selecionadas foram integradas em mosaicos para os dois períodos.

Visando comparar o desempenho de detecção das áreas queimadas, o presente estudo avaliou os seguintes índices: *Normalized Burn Ratio* (NBR), *Normalized Burn Ratio-SWIR* (NBRSWIR), *Normalized Difference Shortwave Infrared Index* (NDSWIR), *Mid-Infrared Bi-Spectral Index* (MIRBI) e *Normalized Burn Ratio Plus* (NBR+). Esses índices foram escolhidos por sua sensibilidade às alterações na estrutura da vegetação e à presença de resíduos carbonizados, aspectos fundamentais na detecção de áreas afetadas pelo fogo. A seleção considerou cinco propostas distintas disponíveis na literatura, com datas de publicação variadas, o que permitiu abranger desde métodos mais consolidados até abordagens mais recentes. Outro critério adotado foi a utilização, por todos os índices, das bandas B11 e B12 do sensor Sentinel-2A, reconhecidas por sua eficácia na identificação de queimadas. As bandas utilizadas, bem como as fórmulas de cada índice são expostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Índices espectrais, formulação e referência

Índices	Fórmulas dos índices espectrais testados no estudo	Referência
NBR	$\frac{B12 - B8A}{B12 + B8A}$	KEY; BENSON (2006)
NBRSWIR	$\frac{B12 - B11 - 0,02}{B12 + B11 + 0,1}$	LIU <i>et al.</i> (2020)
NDSWIR	$\frac{B11 - B8A}{B11 + B8A}$	GERARD <i>et al.</i> (2003)
MIRBI	$10 * B12 - 9,8 * B11 + 2$	TRIGG; FLASSE (2001)
NBR+	$\frac{(B12 - B8A - B3 - B2)}{(B12 + B8A + B3 + B2)}$	ALCARAS <i>et al.</i> (2022)

As fórmulas apresentadas utilizam bandas do sensor Sentinel-2A, sendo: B2 (blue), B3 (green), B8A (NIR), B11 (SWIR 1) e B12 (SWIR 2). Fonte: Elaborado pelos autores.

## Avaliação da acurácia

A avaliação da acurácia foi realizada através da comparação dos dados de referência com o mapa gerado a partir de cada índice. Para isso, utilizou-se como referência o mapa de queimadas do MapBiomas (2022), dos meses de agosto e setembro de 2022. Sendo assim, foi necessário classificar os resultados dos índices segundo a classificação binária dos resultados

(queimado/ não queimado). Essa classificação se deu a partir da implantação de limiares, os quais foram obtidos por meio da análise dos valores em diferentes regiões das imagens. Dessa forma, foi possível fazer a comparação de cada classe dos mapas gerados a partir dos índices de queimadas com as respectivas classes do mapa de referência, por meio da superposição de todos os pixels da área de estudo. Esse método elimina as incertezas existentes nos métodos que utilizam de criação amostras para validar os resultados. A partir dessa análise, foi possível obter os valores das acurárias do produtor, consumidor e global.

Para a avaliação das acurárias, é necessário compreender os seguintes termos: verdadeiros positivos (VP), que se referem às áreas corretamente classificadas como pertencentes à classe de interesse; verdadeiros negativos (VN), que são as áreas corretamente classificadas como não pertencentes à classe de interesse; falsos negativos (FN), que correspondem às áreas erroneamente classificadas como não pertencentes à classe de interesse; e, por fim, falsos positivos (FP), que representam as áreas erroneamente classificadas como pertencentes à classe de interesse. A acurácia do produtor, que indica a frequência com que os pixels de referência de determinada classe foram classificados corretamente, é expressa na Equação 1.

$$\text{Acurácia do produtor} = \frac{VP}{VP + FN} \quad (\text{Equação 1})$$

A acurácia do consumidor, demonstrada a partir da Equação 2, reflete a probabilidade de um pixel classificado realmente pertencer àquela classe.

$$\text{Acurácia do consumidor} = \frac{VP}{VP + FP} \quad (\text{Equação 2})$$

A acurácia global, descrita na Equação 3, é uma medida simples entre o total de acertos em relação ao total de entradas.

$$\text{Acurácia global} = \frac{VP + VN}{VP + FP + VN + FN} \quad (\text{Equação 3})$$

## Resultados e Discussão

A aplicação dos cinco índices espectrais na plataforma *Google Earth Engine* possibilitou a geração de mapas binários de áreas queimadas e não queimadas para o município de Uberaba, permitindo avaliar o desempenho de cada índice na detecção de áreas queimadas. Os valores de acurácia extraídos das matrizes de confusão estão sistematizados na Tabela 2. De modo geral, a acurácia da classe não queimada foi superior à classe queimada para todos os índices. Essa característica também foi observada em estudos similares (COELHO *et al.*, 2022; TEIXEIRA, 2020), uma vez que a classe queimada possui maior confusão espectral em relação aos outros alvos da imagem.

Tabela 2 – Acurácia dos índices extraídos da matriz de confusão: AP (Acurácia do produtor); AC (Acurácia do consumidor); AG (Acurácia global)

Índices	Área (queimada) (km <sup>2</sup> )	AP (queimada) (%)	AC (queimada) (%)	AP (não queimada) (%)	AC (não queimada) (%)	AG (%)
NBR	818,90	69,07	1,96	82,11	99,81	82,04
NBRSWIR	75,34	82,88	25,55	98,75	99,91	98,67
NDSWIR	1019,96	16,91	0,38	77,36	99,45	77,05
MIRBI	25,37	50,19	45,93	99,69	99,74	99,44
NBR+	1234,81	57,87	1,09	72,79	99,70	72,71

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os índices que demonstraram melhor acurácia global foram o NBRSWIR e o MIRBI, ambos com desempenhos gerais superiores a 98%. Esse alto valor está relacionado com o tamanho da área de estudos, com mais de 4500 km<sup>2</sup> de extensão, no qual predomina a existência da classe não-queimada. Outro aspecto importante é que a quantidade total de área queimada no mapa de referência foi de 23,25 km<sup>2</sup>, de modo que o MIRBI conseguiu obter um valor muito próximo. Os demais índices apresentaram muitos falsos positivos, com valores de áreas de queimadas altos, em função da confusão espectral existente com o entorno, principalmente locais com solo exposto.

Assim, é preciso considerar as características do alvo escolhido no presente estudo, bem como o tipo de uso do solo em que ele está inserido. Conforme discutido por Oliva *et al.* (2011), a presença de múltiplas culturas em diferentes estágios de crescimento em uma única área de agricultura pode complicar ainda mais a detecção de áreas queimadas. Além disso, Campagnolo *et al.* (2021), ressaltam que quanto menor o incêndio, maior é a dificuldade em detectá-lo. Em contrapartida, Giglio *et al.* (2016) alegam que, quanto mais intenso for o fogo, mais fácil é detectá-lo e, portanto, o fator primordial é a intensidade do mesmo.

Franquesa *et al.* (2022) utilizaram o GEE para combinar dados Landsat e Sentinel-2 para mapear áreas queimadas em escala global e constataram uma alta taxa de erro de omissão em áreas agrícolas, de cerca de 85%. Da mesma forma, valores elevados de erros de omissão de áreas queimadas foram observados em áreas úmidas com vegetação herbácea. Esses resultados evidenciam os desafios enfrentados na detecção de áreas queimadas em diferentes tipos de cobertura terrestre e enfatizam a necessidade de melhorias na precisão dos algoritmos de detecção de áreas queimadas.

Ao analisar apenas a acurácia da classe queimada, nota-se que os índices NBRSWIR e o MIRBI também apresentaram os melhores resultados, considerando os dois tipos de análise de acurácia feita no presente estudo. Assim, o NBRSWIR evidenciou maior acurácia do produtor (82,88%), ou seja, mostrou um melhor desempenho para detectar queimadas reais, as quais foram detectadas pelo MapBiomas. No entanto, esse índice também gerou áreas queimadas que não existiam de fato, e por isso apresentou baixa acurácia do consumidor. Por outro lado, o MIRBI apresentou um equilíbrio melhor entre a capacidade de detectar queimadas reais e gerar poucos falsos positivos. O bom desempenho desses dois índices pode estar relacionado com a combinação de sensibilidade espectral e amplitude radiométrica das bandas do infravermelho de ondas curtas (SWIR). Assim, nota-se que houve uma diferença significativa de desempenho entre os índices que usaram, concomitantemente, as bandas 11 e 12 do Sentinel-2A, as quais correspondem à região espectral do infravermelho de ondas curtas.

Conforme abordado pelo estudo conduzido por Perea-Ardila *et al.* (2023), na análise pós-queimada, observou-se um aumento da refletividade nas bandas 11 e 12, indicando algum

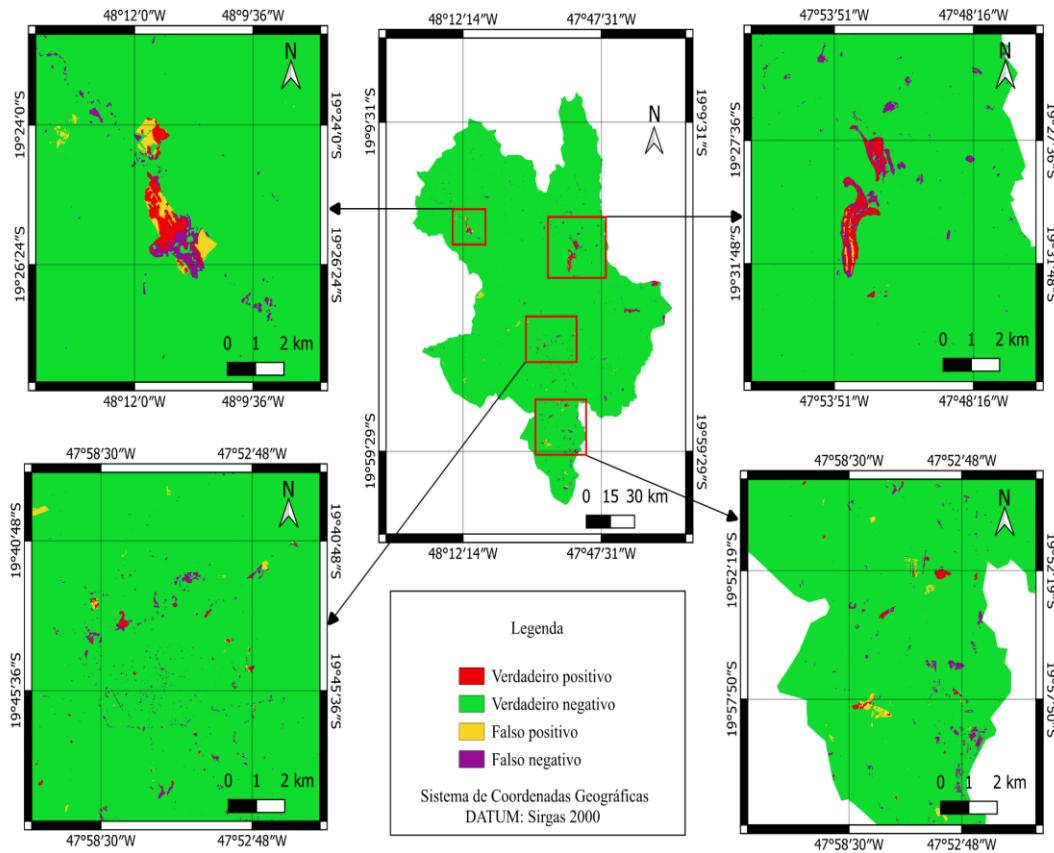
tipo de dano à cobertura vegetal presente na área. Segundo os referidos autores, as bandas do infravermelho de ondas curtas permitem a identificação de mudanças na condição da vegetação devido à ação do fogo. Essas bandas são sensíveis às alterações na estrutura e no conteúdo de água das plantas, proporcionando uma ferramenta eficaz para a detecção de danos ambientais causados por incêndios. Roteta *et al.* (2019), ao analisar as queimadas na África Subsaariana, afirmam que as bandas B11 e B12 do Sentinel-2A mostraram ser complementares devido às suas diferentes distribuições de frequência, o que reduz os erros ao serem usados em conjunto. Os autores constataram que a sensibilidade da região do infravermelho de ondas curtas à detecção de resíduos de cinzas e brasas quentes explica o bom desempenho dos índices MIRBI e NBR2. Esses achados corroboram os resultados obtidos por Roteta *et al.* (2019) e Perea-Ardila; Muñoz; Sopchak (2023), que destacam a importância das bandas SWIR na detecção de alterações biofísicas em vegetação queimada. A refletância aumentada nessas bandas após o evento de fogo indica perda de biomassa e alterações no conteúdo hídrico da vegetação remanescente.

Os demais índices NBR, NDSWIR e NBR+ apresentaram desempenho inferior, principalmente quando analisada apenas a classe queimada. Esses índices apresentaram fraca distinção entre áreas queimadas e outras coberturas, principalmente o solo exposto. Tal fato ocasionou elevada taxa de falsos positivos de áreas queimadas no município. Essa dificuldade de detecção pode estar relacionada à utilização isolada da banda B11 ou da B12, reduzindo a capacidade de discriminação dos alvos de interesse. Nesse sentido, observa-se que o NBR+, apesar de ser o único índice espectral multibanda, não obteve os melhores resultados de acurácia. Os índices espectrais multibanda, os quais são fórmulas matemáticas construídas a partir da combinação de mais de duas bandas, têm o objetivo de destacar características específicas da superfície terrestre. Dessa forma, sugere-se para estudos futuros a análise da potencialidade de índices multibanda que englobam especificamente a região do infravermelho de ondas curtas para a detecção de queimadas em áreas antropizadas do Cerrado.

Estudos anteriores relatam desempenhos variados de índices espetrais, dependendo do bioma, resolução das imagens e metodologia de validação empregada. Alcaras *et al.* (2022), por exemplo, obtiveram acurácia do produtor de 74,9% para o MIRBI e do consumidor de 94,7% para o índice BAIS2 em áreas com predominância de savana tropical. Já Farhadi *et al.* (2022), ao aplicar o MIRBI em ambientes áridos, encontraram acurácia do produtor de 67,69% e do consumidor de 71,63%. Tais variações reforçam que o desempenho dos índices é fortemente influenciado pelas características ambientais e espetrais do contexto de aplicação. Nesse sentido, Boschetti *et al.* (2019) observaram que o erro na detecção de queimadas pode ser influenciado pelo bioma em que ela ocorre. Os autores constataram que o mapeamento das queimadas em florestas boreais, savanas tropicais e savanas temperadas demonstraram menores erros, pois as áreas afetadas são mais extensas e suas cicatrizes persistem por mais tempo.

O método de avaliação da acurácia é um dos principais fatores a ser observado para que a análise do resultado seja feita adequadamente. Radoux; Bogaert (2017) explicam que existem estudos em que a acurácia é baseada na contagem de elementos, enquanto outros estudos realizam a avaliação a partir da área. Segundo os autores, para mapas que classificam toda a região de estudo, a área classificada corretamente se torna a principal preocupação. Nesse sentido, o presente estudo realizou uma validação exaustiva dos resultados, ou seja, toda a área do mapa de referência do MapBiomas foi comparada com os mapas gerados dos índices. A Figura 2 exibe um exemplo da validação dos dados a partir do resultado da classificação do índice MIRBI.

Figura 2: Cruzamento dos dados de referência e a classificação pelo MIRBI



Fonte: Elaborado pelos autores.

O estudo de Laneve *et al.* (2024) revelou que a estimativa inicial de acurácia para produtos globais, usando sensores de satélite de alta resolução como Landsat em comparação com MODIS, mostrou taxas de erro de comissão e omissão altas, com 42% e 68%, respectivamente. Embora a série de satélites Landsat seja amplamente empregada para análises das transformações de uso e cobertura do solo ao longo de séries históricas, Astola *et al.* (2019) destacam que satélites como o Sentinel-2 possuem sensores capazes de fornecer imagens com resoluções espaciais e espectrais superiores às do Landsat, o que pode ter um impacto nas análises ambientais.

No campo da legislação, nota-se que houve avanços nos últimos anos em relação ao uso do fogo nas áreas rurais. A Lei Federal nº 12.651/2012, que instituiu o Novo Código Florestal Brasileiro, estabelece três situações em que o uso do fogo é permitido: (a) em locais ou regiões cujas peculiaridades justifiquem o emprego do fogo em práticas agropastoris ou florestais, mediante prévia aprovação do órgão estadual ambiental competente do SISNAMA; (b) no emprego da queima controlada em Unidades de Conservação; e (c) em atividades de pesquisa científica (BRASIL, 2012).

Em Minas Gerais, compete ao Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) regulamentar detalhadamente o uso do fogo em plantações. A Deliberação Normativa do COPAM nº 213, de 22 de fevereiro de 2017, estabelece a eliminação gradual da queima da palha da cana-de-açúcar (MINAS GERAIS, 2017). De acordo com essa normativa, a prática deve ser erradicada completamente até 2031, no entanto, conforme relatado pela CONAB (2021), atualmente, ainda se observa a presença do fogo em muitas áreas produtoras de cana que realizam a colheita mecanizada. Essa prática pode ser justificada pelo aumento do rendimento das máquinas, o que facilita o processo de colheita. É importante ressaltar que, muitas vezes,

conforme observado por Ribeiro *et al.* (2021), os incêndios possuem origem criminosa, principalmente próximos às estradas. Sendo assim, o fogo é frequentemente utilizado como uma forma de desafio às instituições estatais.

## Conclusão

A avaliação comparativa entre cinco índices espectrais obtidos a partir de imagens Sentinel-2A demonstrou que os índices NBRSWIR e MIRBI apresentaram o desempenho mais satisfatório na identificação de áreas queimadas em ambientes agrícolas do bioma Cerrado, o que confirma a hipótese estabelecida neste estudo. A elevada performance desses dois índices pode estar associada ao uso conjunto das bandas B11 e B12, inseridas no intervalo espectral do infravermelho de ondas curtas, cuja resposta espectral é sensível às modificações biofísicas induzidas pela queima da vegetação. O índice NBRSWIR destacou-se por sua alta acurácia do produtor, evidenciando precisão na detecção de áreas efetivamente queimadas, enquanto o MIRBI apresentou desempenho superior na acurácia do consumidor, com menor ocorrência de falsos positivos.

Recomenda-se para estudos futuros uma análise que englobe um intervalo temporal maior, uma vez que no presente estudo foi utilizado apenas o ano de 2022. Além disso, é sugerida a escolha de outras áreas de estudo, bem como outros índices e sensores, para preencher a lacuna existente na literatura sobre a detecção de áreas queimadas em regiões agrícolas. Assim, espera-se alcançar o aperfeiçoamento dos índices que detectam queimadas em locais complexos, possibilitando uma análise rápida e confiável por parte dos atores envolvidos na gestão desse problema.

É importante destacar que algumas bases de dados existentes, como o MapBiomas, possui um atraso na disponibilização dos dados, o que enfatiza a importância do domínio de técnicas que possam ser aplicadas em imagens recentes. A metodologia apresentada pode ser adaptada para ações de fiscalização ambiental, estando em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), uma vez que as queimadas liberam grande quantidade de gases de efeito estufa.

A utilização do GEE possibilitou o processamento automatizado, rápido e confiável de grandes volumes de dados orbitais, garantindo reprodutibilidade e acurácia nas etapas de pré-processamento e cálculo dos índices espectrais. Essa infraestrutura computacional em nuvem mostrou-se especialmente vantajosa em contextos municipais, permitindo a análise de áreas extensas com custo operacional reduzido.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) pelo financiamento de projeto de pesquisa de Iniciação Científica.

## Referências

ALCARAS, E.; CONSTANTINO, D.; GUASTAFERRO, F.; PARENTE, C.; PEPE, M. *Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): a new index for Sentinel-2 imagery*. **Remote Sensing**, v. 14, 2022, p. 1727. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14071727>

ALMEIDA, T. S.; CALIJURI, M. L.; PINTO, L. B. Zoneamento agro-climático da cana-de-açúcar para o estado de Minas Gerais com base em regressões múltiplas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, 2013, p. 352-355. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000300011>

ARRUDA, V. L. S.; PIONTEKOWSKI, V. J.; ALENCAR, A.; PEREIRA, R. S.; MATRICARDI, E. A. T. *An alternative approach for mapping burn scars using Landsat imagery, Google Earth Engine, and Deep Learning in the Brazilian Savanna.* **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 22, 2012, p. 100472. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.100472>

ASTOLA, H.; HÄME, T.; SIRRO, L.; MOLINIER, M.; KILPI, J. *Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region.* **Remote Sensing of Environment**, v. 223, 2019, p. 257-273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.019>

BA, R.; SONG, W.; LI, X.; XIE, Z.; LO, S. *Integration of multiple spectral indices and a neural network for burned area mapping based on MODIS data.* **Remote Sensing**, v. 11, 2019, p. 326. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11030326>

BOSCHETTI, L.; ROY, D. P.; GIGLIO, L.; HUANG, H.; ZUBKOVA, M.; HUMBER, M. L. *Global validation of the collection 6 MODIS burned area product.* **Remote Sensing of Environment**, v. 235, 2019, p. 111490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111490>

BRASIL. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos, nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm)>. Acesso em: 11 mar. 2025. **Diário Oficial da União** em: 26 de maio de 2012.

BREXÓ, E. A.; MATTOS, L. M.; SUSZEK, G. Caracterização de uso e ocupação do solo na região do vale do Ivinhema-MS utilizando a plataforma Google Earth Engine. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 6, n. 1, 2023, p. 251–263. DOI: <https://doi.org/10.34188/bjaerv6n1-022>

CAMPAGNOLO, M. L.; LIBONATI, R.; RODRIGUES, J. A.; PEREIRA, J. M. C. A comprehensive characterization of MODIS daily burned area mapping accuracy across fire sizes in tropical savannas. **Remote Sensing of Environment**, v. 252, 2021, p. 112115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112115>.

CHEN, W.; MORIYA, K.; SAKAI, T.; KOYAMA, L.; CAO, C. X. *Mapping a burned forest area from Landsat TM data by multiple methods.* **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 7, 2016, p. 384-402. DOI: <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.925982>

COELHO, M. H.; MORELLI, F.; BITTENCOURT, O. O.; SANTOS, R. Método para a Classificação de Áreas Queimadas Baseado em Aprendizado de Máquina Automatizado. **Anais XIII Computer on the Beach - COTB'22**, Itajaí, SC, 2022. p. 029-036. Disponível em: <https://periodicos.univali.br/index.php/acotb/article/view/18707>. Acesso em: 11 mar. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Safra 2021/22 – Primeiro levantamento.** v. 8, 2021, p. 87. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/divulgacao-do-1º-levantamento-da-safra-de-graos-safra-2021-22-realizada-pela-conab-comparticipacao-do-inpe-mcti>. Acesso em: 11 mar. 2025.

DALDEGAN, G. A.; ROBERTS, D. A.; RIBEIRO, F. D. F. *Spectral mixture analysis in Google Earth Engine to model and delineate fire scars over a large extent and a long time-series in a rainforest-savanna transition zone.* **Remote Sensing of Environment**, v. 232, 2019, p. 111340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111340>

FARHADI, H.; MOKHTARZADE, M.; EBADI, H.; BEIRAMI, B. A. *Rapid and automatic burned area detection using Sentinel-2 time-series images in Google Earth Engine cloud platform: a case study over the Andika and Behbahan regions, Iran.* **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, 2022, p. 369. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10045-4>

FRANQUESA, A. M.; STEHMAN, S. V.; CHUVIECO, E. *Assessment and characterization of sources of error impacting the accuracy of global burned area products.* **Remote Sensing of Environment**, v. 280, 2022, p. 113214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113214>

GERARD, F.; PLUMMER, S.; WADSWORTH, R.; SANFELIU, A. F.; ILIFFE, L.; BALZTER, H. *Forest fire scar detection in the boreal forest with multitemporal spot-vegetation data.* **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, 2023, p. 2575-2585. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.819190>

GIGLIO, L.; SCHROEDER, W.; JUSTICE, C. O. *The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products.* **Remote Sensing of Environment**, v. 178, 2016, p. 31-41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.054>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades: Uberaba.** 2022. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/uberaba/panorama>>. Acesso em: 09 mar. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Banco de Dados de Queimadas (BDQueimadas).** 2021. Disponível em:  
<http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas>. Acesso em: 09 mar. 2025.

KEY, C. H.; BENSON, N. **Landscape assessment (LA) sampling and analysis methods.** USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-164-CD. (Fort Collins, CO), 2006. Disponível em:  
[https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs\\_gtr164/rmrs\\_gtr164\\_13\\_land\\_assess.pdf](https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr164/rmrs_gtr164_13_land_assess.pdf). Acesso em: 09 mar. 2025.

LANEVE, G.; DI FONZO, M.; PAMPANONI, V.; MORLES, R. B. *Progress and limitations in the satellite-based estimate of burnt areas.* **Remote Sensing**, v. 16, 2024, p. 42, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16010042>.

LIU, S.; ZHENG, Y.; DALPONTE, M.; TONG, X. *A novel fire index-based burned area change detection approach using Landsat-8 OLI data.* **European Journal of Remote Sensing**, v. 53, 2020, p. 104-112. DOI: <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1738900>

MAHDIANPARI, M.; SALEHI, B.; MOHAMMADIMANESH, F.; HOMAYOUNI, S.; GILL, E. *The first wetland inventory map of Newfoundland at a spatial resolution of 10 m using Sentinel1 and Sentinel-2 data on the Google Earth Engine cloud computing platform.* **Remote Sensing**, v. 11, 2019, p. 43. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11010043>

MAPBIOMAS. **Coleção de séries de mapas de uso e cobertura do solo brasileiro.** 2023. Disponível em: <http://mapbiomas.org/>. Acesso em: 09 mar. 2025.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa COPAM n. 213, de 22 de fevereiro de 2017. **Diário Executivo.** Regulamenta o disposto no art. 9º, inciso XIV, alínea “a” e no art. 18, § 2º da Lei Complementar Federal nº 140, de 8 de dezembro de 2011 [...]. Belo Horizonte, MG, 2017. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=43778>. Acesso em: 11 mar. 2025.

MPAKAIRI, K. S.; NDAIMANI, H.; KAVHU, B. *Exploring the utility of Sentinel-2 MSI derived spectral indices in mapping burned areas in different land-cover types.* **Scientific African**, v. 10, 2020, p. 565. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00565>

OLIVA, P.; MARTIN, P.; CHUVIECO, E. *Burned area mapping with MERIS post-fire image.* **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, 2011, p. 4175-4201. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.489062>

PANTALEÃO JÚNIOR, C. M.; FERREIRA, R. V. Avaliação do desempenho do índice ΔNBR para a identificação de áreas incendiadas na Microrregião de Uberaba, MG. **Brazilian Geographical Journal**, v. 11, n. 2, 2020, p. 159–169. DOI: <https://doi.org/10.14393/BGJ-v11n2-a2020-52096>

PEREA-ARDILA, M. A.; MUÑOZ, S. I.; SOPCHAK, C. H. Análise de áreas queimadas utilizando imagens Sentinel-2 no Parque Estadual do Cocó, Região Metropolitana de Fortaleza (Ceará). **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 4, 2023, p. 067-083. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10440566>

RADOUX, J.; BOGAERT, P. *Good practices for object-based accuracy assessment.* **Remote Sensing**, v. 9, 2017, p. 646. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9070646>

RIBEIRO, C. S. C.; BUCKER, P. O. M.; ALMEIDA, M. R. R.; TEIXEIRA, D. L. S. Ações antrópicas que exercem pressão sobre o Parque Nacional do Itatiaia. In: **Congresso Nacional de Meio Ambiente**, Poços de Caldas, MG, Brasil, 18, 2021, p. 1-12.

ROTEA, E.; BASTARRIKA, A.; PADILLA, M.; STORM, T.; CHUVIECO, E. *Development of a Sentinel-2 burned area algorithm: generation of a small fire database for sub-Saharan Africa.* **Remote Sensing of Environment**, v. 222, 2019, p. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.011>

SOUZA, H. C. de. **Fogo, mudanças climáticas e a conservação da lacertofauna no Cerrado.** Tese de Doutorado em Ciências do Ambiente. Universidade Federal do Tocantins. Palmas, 2023. 225p.

TEIXEIRA, A. L. S. **Correlação entre índices espectrais de verdor, umidade e senescência e ocorrências de queimadas no Parque Nacional de Brasília.** Dissertação de Mestrado em Geociências Aplicadas. Universidade de Brasília. 2020. 93p.  
TRIGG, S.; FLASSE, S. *An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah.* **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, 2001, p. 2641-2647. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160110053185>

Recebido em: 08/08/2025.  
Aprovado para publicação em: 27/12/2025.