

GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO PARA IDENTIFICAÇÃO DE CICATRIZES DE QUEIMADAS: UMA PROPOSTA METODOLÓGICA PARA O MONITORAMENTO DO PARQUE ESTADUAL DE MIRADOR

Geoprocessing and remote sensing for identification of burned: A methodological proposal for monitoring in the Mirador State Park

Fabício Sousa da Silva

Doutorando em Ciências Ambientais na Universidade Federal do Pará (PPGCA/UFGA), Laboratório de Geoprocessamento da Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Naturais do Maranhão (LABGEO/SEMA) e Departamento de Geografia da Universidade Estadual do Maranhão (DEGEO/UEMA), Brasil.

professorfabiciosousa@gmail.com

Adauto Luís Morais Pestana

Especialista em Geoprocessamento, Laboratório de Geoprocessamento da Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Naturais do Maranhão (LABGEO/SEMA), Brasil.

Adauto.pestana@gmail.com

Lorena Silva e Silva

Graduanda em Engenharia Ambiental (CEUMA), Laboratório de Geoprocessamento da Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Naturais do Maranhão (LABGEO/SEMA)

lornasilva76@outlook.com

Recebido: 25.02.2023

Aceito: 06.06.2023

Resumo

O bioma Cerrado anualmente figura com quantitativos expressivos de queimadas, fato que demonstra a importância do monitoramento desses eventos principalmente quando incidem sobre áreas protegidas tendo em vista o serviço ecossistêmico dessas unidades juridicamente instituídas. Neste estudo, foi desenvolvida uma metodologia semi-automática para o mapeamento de áreas queimadas no Parque Estadual de Mirador, Maranhão, tomando-se como referência o ano de 2022, utilizando-se imagens das missões Landsat-8 e Landsat-9, além de uma cadeia de processos implementada na linguagem python em ambiente SIG QGIS 3.22. Os resultados mostram um acerto de 90,27% para metodologia e evidenciam que há correlação (0.85) entre dimensão de área queimada e focos de queimadas, potencializando o uso dos focos como parâmetro de validação de cicatrizes de forma semiautomática. A dinâmica mensal das cicatrizes apresentou-se de acordo com o reportado na literatura, com a incidência sendo observada entre os meses de maio e outubro. A proposta mostra-se exequível para fins de monitoramento da unidade em questão, cooperando na gestão da unidade estudada.

Palavras-chave: Cerrado; Maranhão; Monitoramento.

Abstract

The Brazilian savanna annually figures expressive quantities of fires, demonstrating the importance of monitoring these events, especially when they affect protected areas given the ecosystem service of these legally established units. In this study, a semi-automatic methodology was developed for mapping burned areas in the Parque Estadual de Mirador, Maranhão, taking the year 2022 as a reference, using images from the Landsat-8 and Landsat-9 satellite, in addition to a chain of processes implemented in the python language in a GIS Qgis 3.22 environment. The results show an accuracy of 90.27% for the methodology and a correlation (0.85) between the size of the burned area and fire outbreaks, enhancing the use of outbreaks as a semi-automatic validation parameter for scars. The monthly dynamics of the scars follow what is reported in the literature, with the incidence being observed mainly between May and October. The chain of processes in a semi-automated GIS QGis environment in Python proves feasible for monitoring the unit in question.

Keywords: Cerrado; Maranhão; Monitoring.

1. INTRODUÇÃO

O bioma Cerrado anualmente figura com quantitativos expressivos de ocorrências de queimadas que se distribuem pelos diferentes estados da federação ao longo dos meses. Em 2021 (INPE, 2021), neste bioma, os maiores quantitativos de áreas queimadas ocorreram nos meses de maio (50,1%), Junho (55,9%), Julho (43,5%) e setembro (40%), quando comparado com os demais biomas do país neste mesmo período.

Para a detectar a extensão e/ou dimensão das áreas queimadas, as imagens oriundas de sensores orbitais de recursos naturais têm sido de grande relevância. Dada a extensão do bioma Cerrado e a ecologia deste que contém o fogo como elemento, este bioma passou a contar com diferentes programas de monitoramento de suas condições principalmente a partir dos anos 2000 (OLIVEIRA *et al.*, 2020)

Diferentes técnicas têm sido utilizadas para detecção remota próxima ao evento ou pós-evento de queimadas, no Brasil, como exemplos podem ser destacados: análise de focos de calor em unidades de conservação (MORELLI *et al.*, 2009; CORREIA; ALENCAR, 2013; CALDAS *et al.*, 2014), classificações supervisionadas, transformações de imagens para estimar queimadas em áreas de proteção (PRUDENTE; ROSA, 2010; ROZA E RIBEIRO, 2013), análise de curva espectral de áreas queimadas (HERNANDEZ, 2021), Modelo Linear de Mistura Espectral (ANDERSON *et al.*, 2005) além de modelos *Deep Learning* em nuvem (ARRUDA, 2021), mais recentemente explorados.

A transformação de imagens (ROSA, 2009) compreende a transformação matemática de bandas espectrais a qual têm como finalidade discriminar informações de

interesse com outros alvos espectralmente próximos, além de normalizar e/ou minimizar efeitos ligados à coleta de dados espaciais, como é o caso de interferências atmosféricas. O Índice de Vegetação por Diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*) - NDVI (ROUSE *et al.*, 1974), o Índice de Água por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Water Index*) - NDWI (MCFEETERS, 1996) e a Razão Normalizada de Área Queimada (*Normalized Burned Ratio*) - NBR (KOUTSIAS; KARTERIS, 1998) são alguns exemplos de índices espectrais amplamente utilizados na literatura para análises ambientais.

KOUTSIAS; KARTERIS (1998) identificaram que as bandas do infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio (MIR) eram capazes de detectar eventos de queima através de uma razão normalizada e, Key e Bensson (1999) aplicaram uma diferença multitemporal para melhor destacar a ocorrências de eventos de queima entre duas datas específicas (DNBR - *Diference Normalized Burned Ratio*).

O presente artigo objetiva estabelecer e avaliar uma proposta metodológica de trabalho utilizando dados públicos oriundos do Sensoriamento Remoto orbital, Geoprocessamento de dados, semiautomatização em python, e avaliação de campo para a identificação de cicatrizes de queimadas dentro dos limites do Parque Estadual de Mirador, Maranhão.

A escolha da área de estudo se deve ao fato de ser uma Unidade de Proteção Ambiental totalmente inserida no bioma Cerrado, naturalmente sujeita a eventos de fogo por conta de sua ecologia, e que apresenta anualmente quantitativos expressivos de focos de calor, observados através do Programa de Monitoramento de Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (BDQ/INPE).

2. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Parque Estadual de Mirador é uma Unidade de Conservação criada e gerida pelo Estado do Maranhão, instituída em 1980 através do Decreto 7641 de 04 de junho de 1980, possuidora de pouco mais de 500 mil hectares (disponível em <https://ucsdoma.sema.ma.gov.br/sample-apps/ucsdoma/>), situada inteiramente no bioma Cerrado. Esta Unidade de Conservação está localizada em grande parte do município de Mirador e em parte dos municípios de Fernando Falcão e São Raimundo das Mangabeiras (Figura 1).

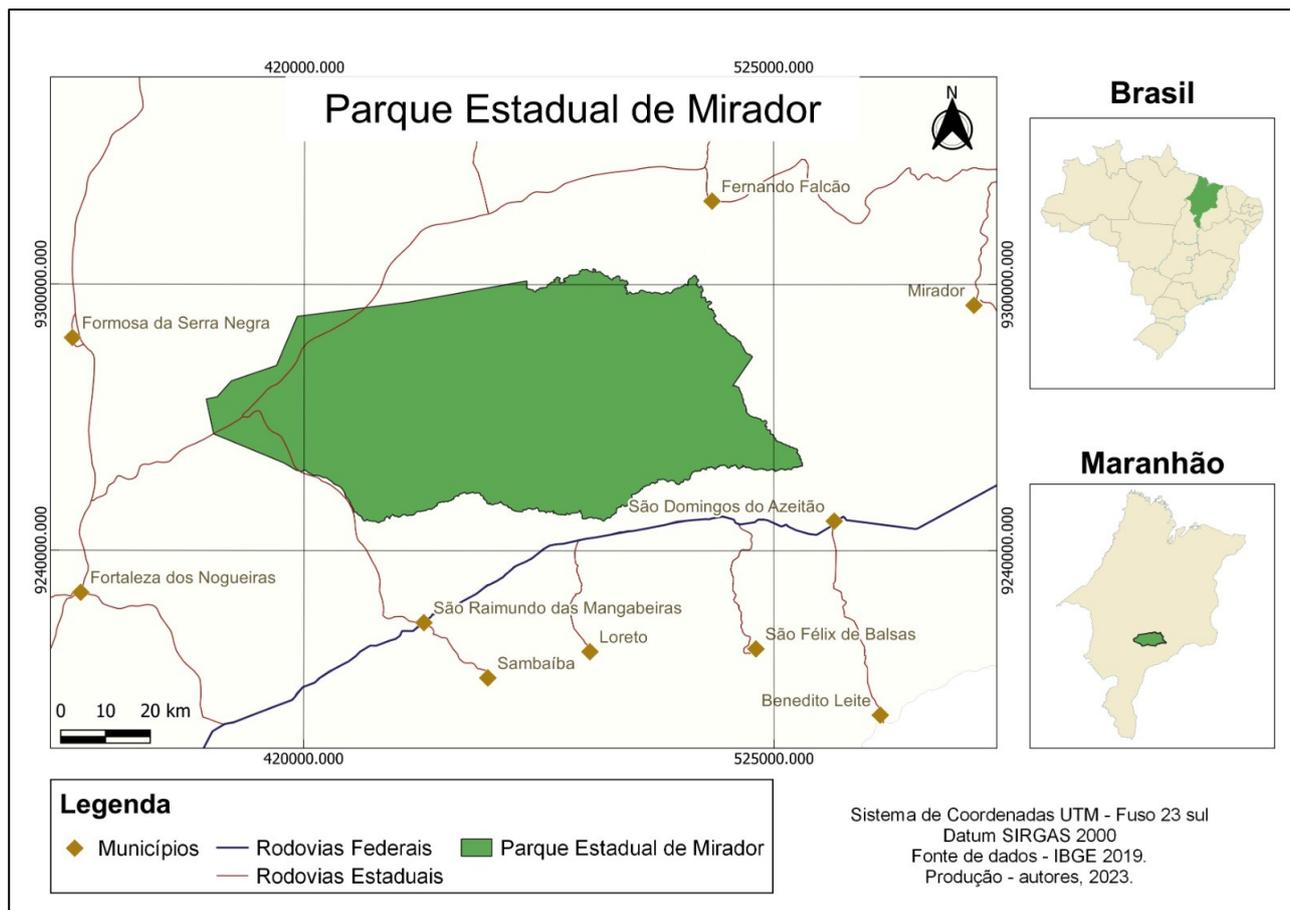


Figura 1 - Localização da área de estudo.

Fonte: Os autores.

Nesta área de proteção, de acordo com o IBGE (2011), estão presentes diferentes fitofisionomias de cerrado, a saber: Savana Parque (Sp) (distribuídas nos fundos de vale locais), Savana Arborizada ou Arbórea (Sas) (presente principalmente no topo da chapada do Itapicuru), além de contato entre a Savana Parque e a Floresta Estacional (na porção norte da unidade) e presença de Savana Gramíneo-Lenhosa, observada por Lemos e Tarouco (2012).

A área de estudo contém diversos cursos hídricos, dos quais se destaca o Rio Itapicuru (conforme documentado pela DSG - Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro), fluindo de oeste para leste, contornando a porção sul da Unidade e fluindo logo após para o norte. Este rio, recebe ainda contribuições do Rio Alpercatas que, por sua vez, contorna o norte da unidade e flui de oeste para leste, desaguando no Itapicuru.

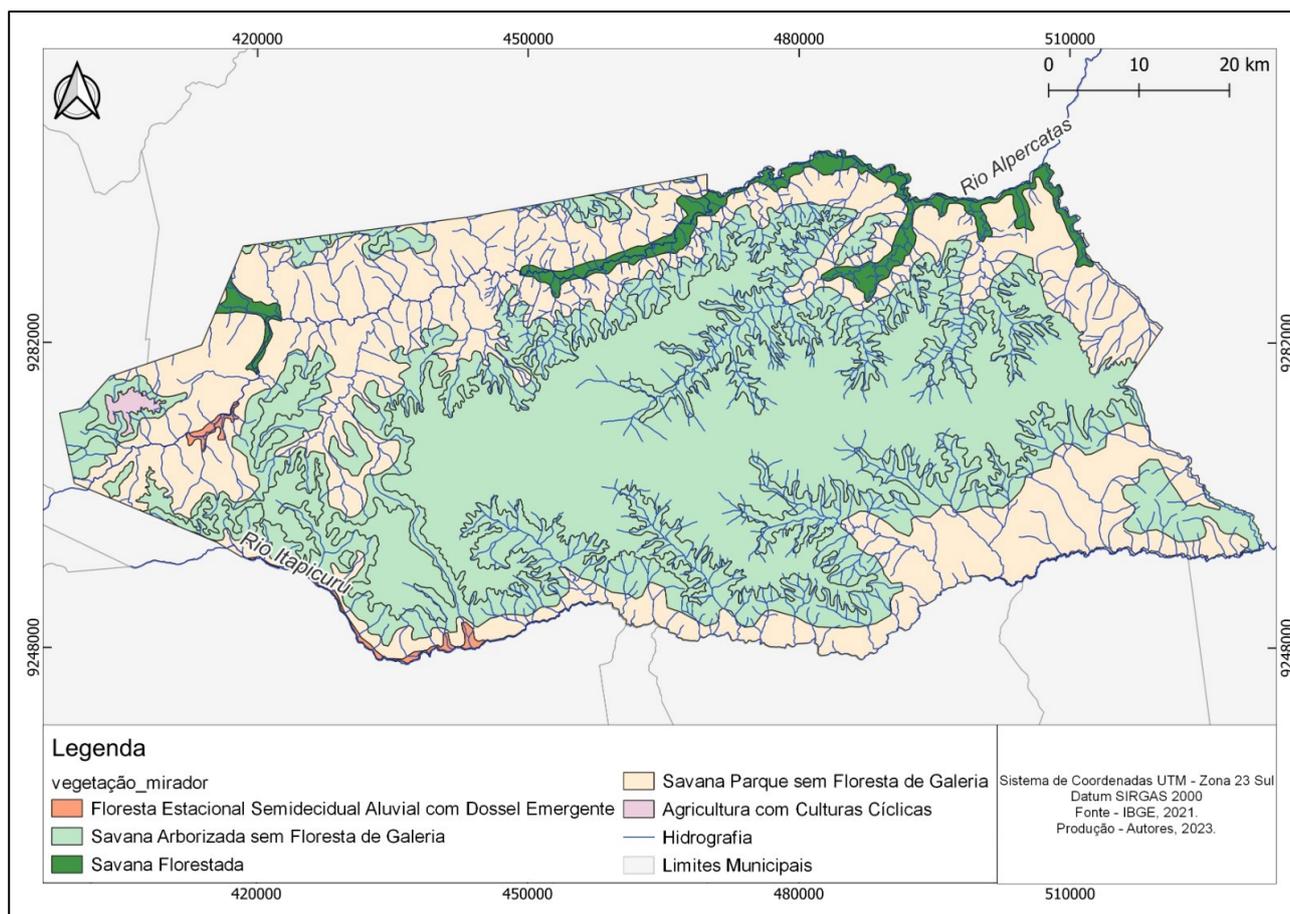


Figura 2 - Cobertura vegetal e cursos hídricos da área de estudo.

Fonte: Os autores.

O período de estiagem na região ocorre entre maio e setembro, com registros pluviométricos de até 60 mm (BARRETO; JESUS, 2018). Por estar situado em um bioma caracteristicamente seco, anualmente a unidade sofre com eventos de queimada, principalmente durante o período considerado de estiagem na região, quando a precipitação diminui, ou se extingue, ao passo que as temperaturas se elevam (CALDAS *et al.*, 2014).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram adquiridas 84 imagens do Sensor *Operational Land Imager* (OLI) a bordo dos satélites Landsat-8 e Landsat-9 (referente as faixas do infravermelho próximo, infravermelho médio e o produto QA_Pixel), gratuitamente no portal do *United States Geological Survey* - USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>) referentes ao produto coleção 2, nível 2 com conversão da reflectância de superfície. Tais cenas adquiridas referem-se às órbitas/ponto 220/64, 220/65, 221/64 e 221/65 e compreendem os meses de maio, junho, julho, agosto, setembro e outubro de 2022.

Em relação às cenas orbitais escolhidas para análise, as quais foram selecionadas manualmente, foram descartadas as cenas cuja área coberta por nuvens na área de estudo estivesse acima de 60%, através de uma análise visual.

O período escolhido para análise corresponde ao período de seca na região (BARRETO; JESUS, 2018) e o período sazonal de maior recorrência de queimadas e extensão de áreas afetadas (SILVA JÚNIOR *et al.*, 2018) no bioma cerrado maranhense.

Criou-se, através do modelador de processos do Qgis 3.22, uma nova ferramenta na linguagem python (*Qpy*) (Figura 3) para semiautomatizar os procedimentos descritos a seguir (Figura 4), permitindo a geração de informações em lote (*batch*) executando sequencialmente o quantitativo de cenas selecionadas. O código da ferramenta encontra-se disponível em <https://github.com/professorfabriciosousa/ScriptsQgis/blob/main/1-identifica-queimada.py>.

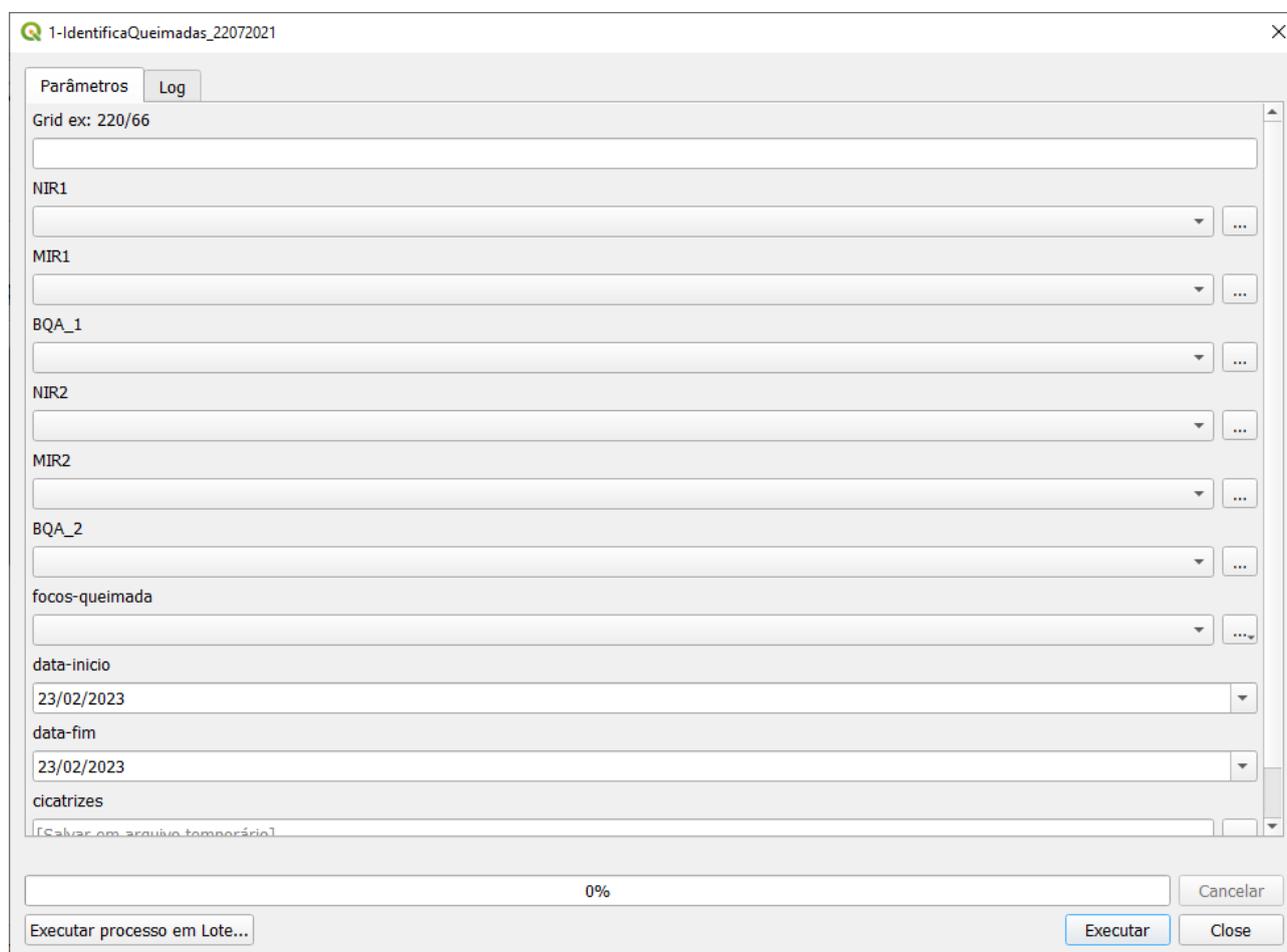


Figura 3 - Caixa de ferramentas desenvolvida para a pesquisa.

Fonte: Os autores.

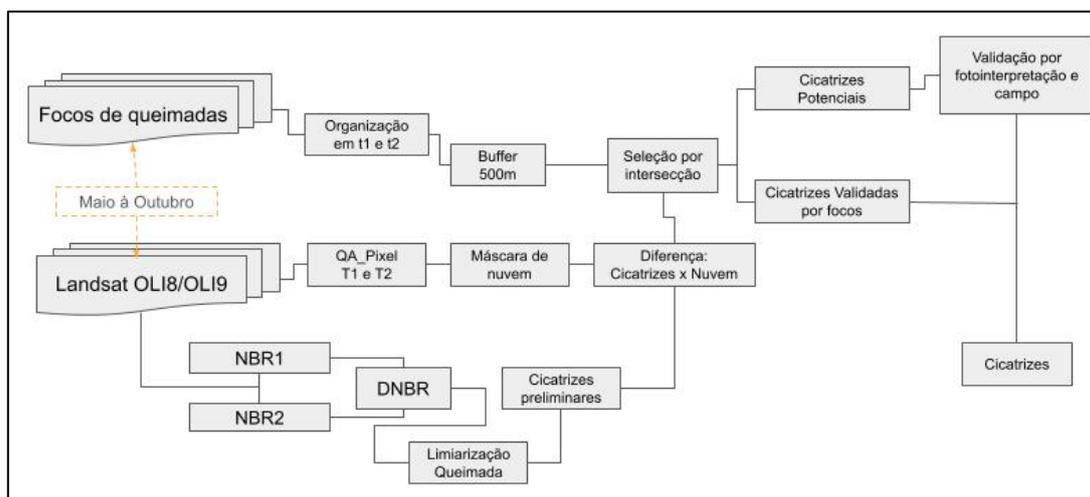


Figura 4 - Fluxograma de procedimentos implementados em linguagem PyQgis.

Fonte: Os autores.

De posse das cenas, procedeu-se com o cálculo do NBR (*Normalized Burn Ratio - Queimada por Razão Normalizada*) para a detecção de áreas de ocorrência de queimadas, denominadas de cicatrizes de queimadas, compreendendo as diferentes datas de análise (eq.01). O NBR corresponde a uma aritmética de bandas capaz de evidenciar em cada DN (*Digital Number*) de pixel áreas que foram submetidas ao processo de queima de biomassa vegetal, considerando as faixas espectrais do infravermelho próximo (NIR - *Near Infrared*) e infravermelho médio (MIR- *Median Infrared*) (KOUTSIAS; KARTERIS, 1998). Para este estudo, aplicou-se o módulo de -1000, visando destacar (com valores positivos mais próximos de 1000) as áreas queimadas e (com valores negativos mais próximos de -1000) as áreas de vegetação não submetidas ao fogo.

$$NBR = \left[\frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2} \right] * (-1000) \quad \text{eq.1}$$

Aplicou-se uma diferença entre os NBR's (KEY E BENSSON, 1999) considerando $\Delta nbr = nbr_{\text{pré-fogo}} - nbr_{\text{pós-fogo}}$ (onde t1 = pré-fogo e t2 = pós-fogo) nas diferentes datas analisadas para destacar áreas queimadas recentes, antigas e áreas não queimadas. Considera-se para fins dessa pesquisa que queima antiga é aquela observada já em t1 e queima recente aquela observada apenas em t2 a qual tende a apresentar os maiores valores de DN, por conta da proximidade entre o evento e o imageamento do sensor (Figura 5).

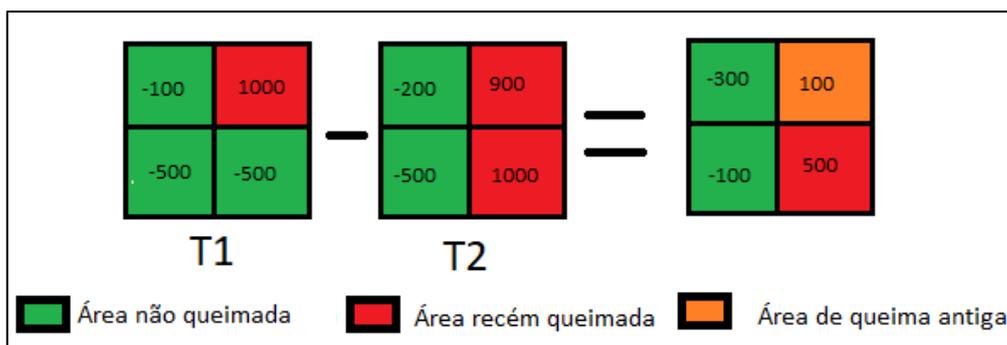


Figura 5 - Esquema comparativo de alteração empírica dos valores de cada pixel em Δnbr .
Fonte: Os autores.

Para separar áreas queimadas, escolheu-se o limiar de 100 em Δnbr , por conta das variações empíricas do valor de DN após o evento, considerando a perda de reflectância da cicatriz de queimada ao longo do tempo (PEREIRA, 2017), as severidades apontadas por Teobaldo e Baptista (2013) e a resolução temporal de 8 dias (integrando OLI-8 e OLI-9). Esse processo foi realizado utilizando-se o módulo da calculadora raster do SAGA Raster mediante a equação 02 (SILVA *et al.*, 2018):

$$\text{"ifelse}((NBRt1-NBRt2)>0.1, 1, 0)\text{"} \quad \text{eq. 02}$$

Após identificadas as potenciais áreas queimadas, verificadas pelos processos anteriores, procedeu-se com a poligonização dessas áreas, que foram ainda submetidas a um processo de diferenciação com áreas possuidoras de cobertura de nuvem, visando retirar anomalias (valores altos originados do Δnbr) que possam ser erroneamente sinalizadas como cicatrizes. A máscara de nuvem foi obtida através do Produto QA_Pixel, disponibilizado no conjunto de dados de cada cena OLI-8 para evitar anomalias em Δnbr . Considerou-se nuvem e sombra os valores > 22500, conforme USGS (2022). O processo de elaboração desta máscara também se deu através do módulo SAGA RASTER considerando a função da equação 03.

$$\text{"ifelse}(QA_Pixel > 22500, \text{Nuvem e Sombra}, \text{Sem cobertura de sombra e nuvens})\text{"} \quad \text{eq}(03).$$

Definiu-se um raio de 500 metros a partir de cada foco de calor (BDQ INPE), tendo em vista que tais focos podem apresentar erro médio posicional que varia entre 400m e 1km (INPE, 2022). Tal raio (buffer) foi considerado como área possível de ocorrência de uma cicatriz de queimada e foram criados considerando a correspondência de faixa temporal das datas OLI-8 e OLI-9 para os tempos t1 e t2.

As cicatrizes originadas do processo de diferença com cobertura de nuvens foram sobrepostas às zonas de focos de queimadas (citado anteriormente) utilizando-se a função de seleção por intersecção disponível no QGis. As cicatrizes que intersectam o raio de focos de calor, foram automaticamente consideradas cicatrizes validadas e foram dissolvidas para o mês de referência. Cicatrizes sem intersecção com focos (denominadas cicatrizes potenciais) foram separadas para validação.

A validação deu-se através do processo homem-máquina apoiado por chave de interpretação construída a partir de dados obtidos em campo. Realizou-se uma inspeção de campo, utilizando o aplicativo QField, receptor de sinal GNSS (Global Navigation Satellite System) Garmim e máquina fotográfica, selecionando aleatoriamente as cicatrizes potenciais cujos acessos viários e/ou aéreos eram possíveis. Com o uso de uma aeronave remotamente pilotada (RPA) Mavic Air 2, pilotada em princípio de sombra, realizou-se também inspeção de grandes áreas com difícil acesso.

Os dados de campo deram origem à uma chave de fotointerpretação utilizando-se cenas do Satélite Sentinel 2A e 2B (obtidas gratuitamente no Sci Hub da Agência Espacial Europeia) referentes ao final de cada um dos meses avaliados e considerando uma composição colorida Falsa-Cor R4G8B3. A escolha de tais faixas espectrais decorre do fato de tais comprimentos de ondas já terem sido utilizados por Silva *et al.* (2019) na área de estudo e em outras áreas do cerrado (PEREIRA JÚNIOR, 1992) com expressivos resultados para identificação visual de áreas queimadas, permitindo ainda a separabilidade entre áreas recém-queimadas e áreas queimadas há mais tempo. Após a etapa de validação, aferiu-se uma estatística de acerto considerando:

$$Pa = 100 - \left(\frac{anq}{aq} * 100 \right) \quad \text{eq.04}$$

Onde:

Pa = Percentual de acerto na identificação da queimada pela metodologia proposta;

anq = localidades de falsos positivos identificados;

aq = localidade queimada identificada pelo método;

Por fim, gerou-se uma análise de correlação comparando o quantitativo de focos e a área atingida por eventos de queimada, além de uma análise estatística descritiva do comportamento do evento nos meses analisados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Entre as transformações visuais na cobertura vegetal que podem ser identificados um ambiente de Cerrado recém-submetido ao fogo são: a perda de densidade vegetal, alteração da estrutura dos indivíduos arbóreos, matéria orgânica disposta sobre o solo, além do surgimento de gramíneas tempos após o evento (HENRIQUES, 2002; PEREIRA, 2017).

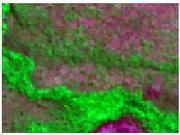
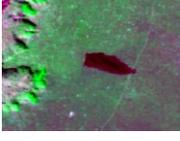
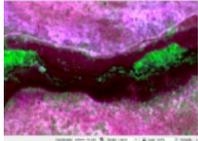
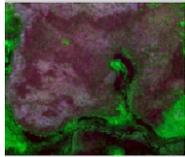
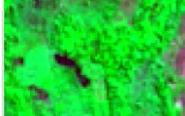
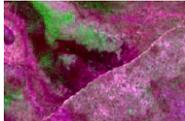
A incursão de campo na área de estudo, já de posse de todas as cicatrizes potenciais, culminou na vistoria de localidades com características de queimadas em áreas com diferentes fitofisionomias, bem como outras não submetidas ao evento (Tabela 1) as quais tinham seus acessos possíveis através das trilhas existentes na Unidade.

Foram observados em campo vestígios recentes de matéria orgânica queimada disposta sobre o solo, alteração da estrutura dos indivíduos arbóreos, além da forte presença de carvão nos locais visitados. Ao se verificar a correspondência com as imagens orbitais, o comportamento de áreas queimadas nas imagens orbitais se deu em tons arroxeados, por conta da perda do vigor vegetativo.

Em um ambiente característico de Savana, a capacidade de detecção de queimadas em imagens orbitais está associada a fatores tais como intensidade do evento, duração do evento, biomassa e permanência do material incinerado sobre a superfície terrestre, conforme destacam Frost e Robertson (1987). Não obstante, Lombardi (2005) acrescenta que, em áreas experimentais do cerrado brasileiro, tais fatores também potencializam a detecção do evento, e Pereira (2017) aponta que as detecções podem sofrer atenuação do sinal pós-evento, a depender das características intrínsecas de cada porção deste bioma.

Outras dificuldades para aferição de cicatrizes por sistemas sensores remotos são apresentados na literatura, tais como: confusão com alvos com características espectrais semelhantes (ex. sombras, corpos d'água, agricultura, rochas), longa permanência do sinal espectral deixado pela deposição das cinzas e da cicatriz na vegetação (PEREIRA *et al.*, 1999; TRIGSS *et al.*, 2001) (Figura 6). A longa permanência da cicatriz, pode levar o usuário a datar o evento de maneira equivocada. Assim, o Δnbr destaca as mudanças entre as datas, permitindo aferir de maneira mais próxima quando o fenômeno ocorreu e minimizando a confusão com outros alvos.

Tabela 1: Chave de interpretação elaborada para fotointerpretação.

Ordem	Descrição	Foto de campo	RGB Sentinel 2
1	Savana Parque sem mata de galeria não atingida por fogo		
2	Savana Arbórea não queimada		
3	Área de Savana Arbórea queimada no topo da chapada do Itapicuru.		
5	Queima em Savana Parque próximo a área de brejo sem floresta de galeria.		
6	Área brejosa com forte presença de gramíneas não submetidas a evento de fogo.		
7	Queima em área de roça.		
8	Cicatriz de queimada observada em vertente na Chapada do Itapicuru.		

Fonte: Os autores.

A inspeção de campo para validação de cicatrizes potenciais demonstrou que dentro da área de estudo ocorreram eventos de queimadas que não foram identificadas pelo Programa de Queimada do INPE (INPE, 2023). É importante destacar que atualmente este programa utiliza diferentes sensores passivos para identificar focos de calor ativos, com pelo menos 30m de extensão e 1m de largura (INPE, 2022) no momento

de sua passagem. As áreas que apresentaram tais ocorrências situam-se às margens do Rio Itapecuru e na porção central do Parque, na Chapada do Itapicuru.



Figura 6 - Localidade atingida por queimada com. Destaque para a biomassa queimada depositada na superfície. **Fonte:** Os autores.

Para o trecho do Rio Itapecuru, verifica-se a existência de cobertura vegetal característica de Savana Parque com estrato predominante de graminóides, posicionada em área brejosa e umedecida no período chuvoso, onde verifica-se a ausência de cobertura vegetal arbórea (Figura 7). Na porção superior da chapada do Itapicuru, verifica-se a presença de Savana Arbórea a qual é possuidora de copas e com altura média dos indivíduos arbóreos na faixa de 5 metros (Figura 8).

A não identificação de focos de queimadas nessas áreas está de acordo com as proposições de Gontijo *et al.* (2011) e INPE (2022) quanto à, respectivamente: 1- Dificuldade de identificação de focos durante período de recorrência de cobertura de nuvens no momento da aquisição dos dados pelos sistemas sensores e; 2- Dificuldade de detecção em áreas com baixa densidade vegetal.

A aplicação da metodologia proposta resultou na criação de 11986 polígonos de cicatrizes para todo o período analisado, os quais foram validados automaticamente (tomando como base os focos de calor (INPE, 2023) e manualmente (através da chave de fotointerpretação). Destaca-se ainda que por conta da cobertura de nuvens nas cenas orbitais de validação, 215 polígonos puderam ser validados através da chave de fotointerpretação (Figura 9).

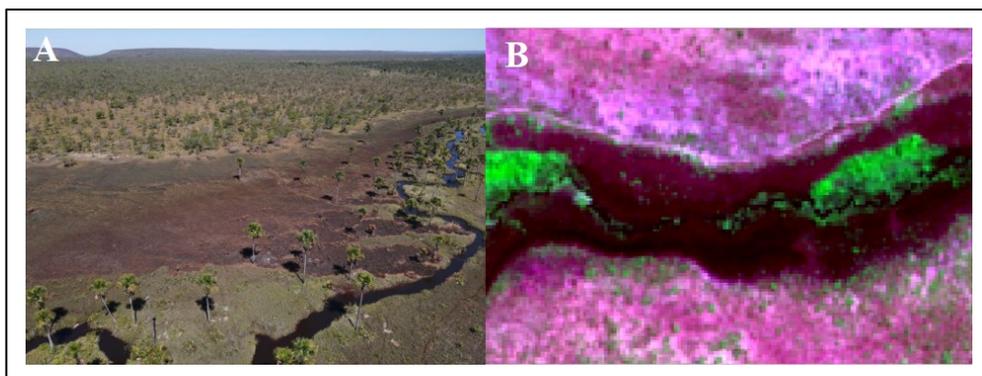


Figura 7 – A) Área de Savana Parque, às margens do Rio Itapecuru identificada como cicatriz potencial (e confirmada em campo), mas sem detecções pelo BDQ INPE, observada em campo no dia 16/08/2022; B) Cicatriz de queimada às margens do Itapicuru, em tom arroxeadado, identificada em cena Sentinel 2-A do dia 16/08/2022. **Fonte:** Os autores.

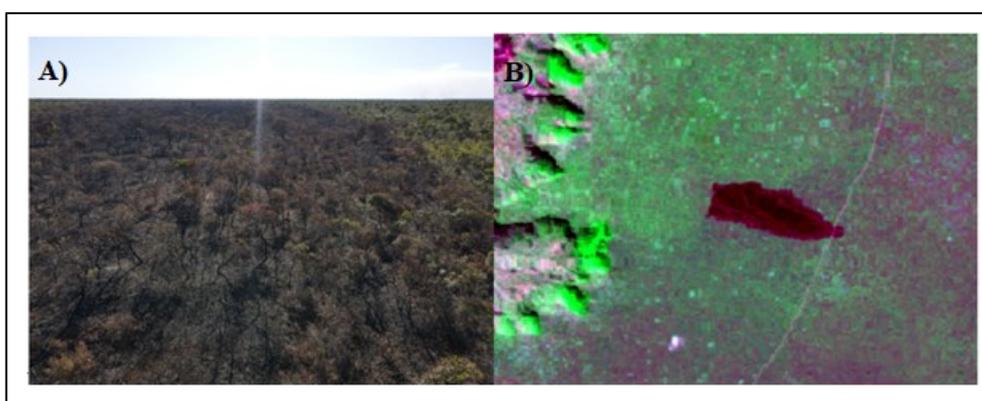


Figura 8 – A) Área de Savana Arbórea no topo da Chapada do Itapicuru com identificação de cicatriz potencial (e confirmada em campo), mas sem detecções pelo BDQ INPE, observada em campo no dia 16/08/2022; B) Cicatriz de queimada no topo da chapada, em tom arroxeadado, identificada em cena Sentinel 2-A do dia 16/08/2022. **Fonte:** Os autores.

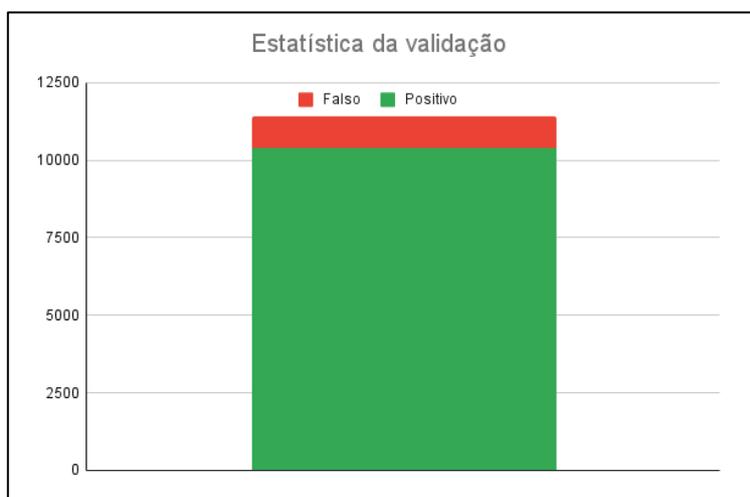


Figura 9 - Perfil estatístico da validação das cicatrizes de queimadas. **Fonte:** Os autores.

O quantitativo de acerto foi computado apenas no universo de polígonos (11411) positivamente (queimada) ou negativamente (não-queimada) que puderam ser validados, descartando assim a incerteza presente nos polígonos não-validados. Tal contabilização

representou $P_a = 90.23\%$. Ao se avaliar a correlação entre cicatrizes e focos de calor, verificou-se uma correlação forte positiva entre as diferentes informações (Figura 10).

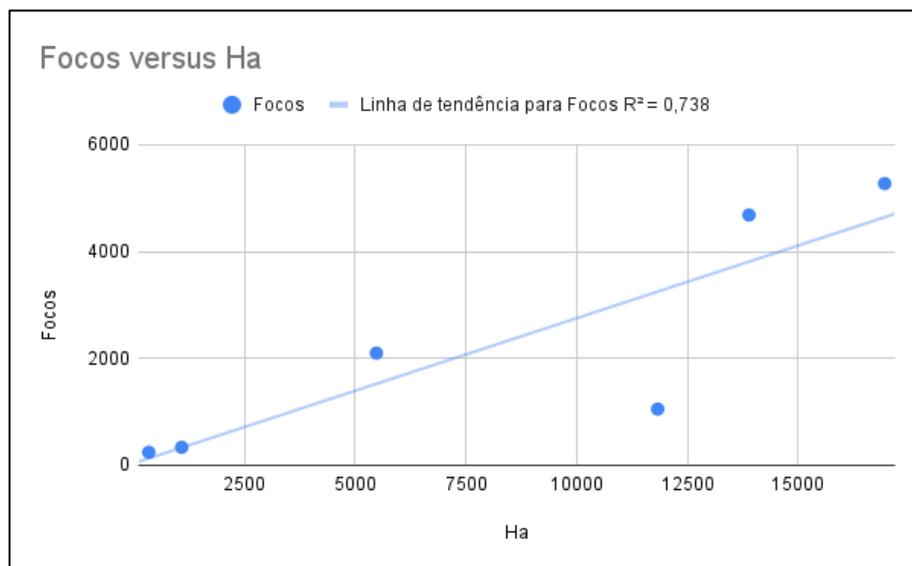


Figura 10 - Correlação forte positiva entre focos e área total mensal atingida por queimada. **Fonte:** Os autores.

A correlação entre o acumulado mensal de focos de queimada e a extensão mensal de cicatrizes de queimadas sinalizou correlação forte positiva (0.85) e mostrou que as cicatrizes obtidas pela metodologia foram capazes de acompanhar a dinâmica do fogo na área de estudo. Tomzhinski *et al.* (2011) e Gontijo *et al.* (2011), ao buscarem relação entre focos de calor e áreas queimadas encontraram, respectivamente valores em torno de 77% e 84 e, Silva *et al.* (2019), para área do Parque de Mirador, encontrou cerca de 86%.

O mês de outubro apresentou maior distância da linha de tendência dos dados. Tal fato pode se relacionar com o início do período de chuvas no cerrado maranhense (NASCIMENTO; MORAIS, 2020) quando a umidade relativa do ar tende a ser mais alta e registros pluviométricos são observados (CALDAS *et al.*, 2014). Por tal quadro, uma maior recorrência na cobertura de nuvens pode ser associada, fato que, conforme observado neste trabalho, e descrito por INPE (2022), são fatores limitantes na detecção dos focos.

Embora os focos de queimada não sejam capazes de indicar extensão espacial direta de uma área afetada por fogo, são capazes de sinalizar a intensidade e duração do fenômeno que pode ser indicativo da extensão de áreas queimadas (Figura 11).

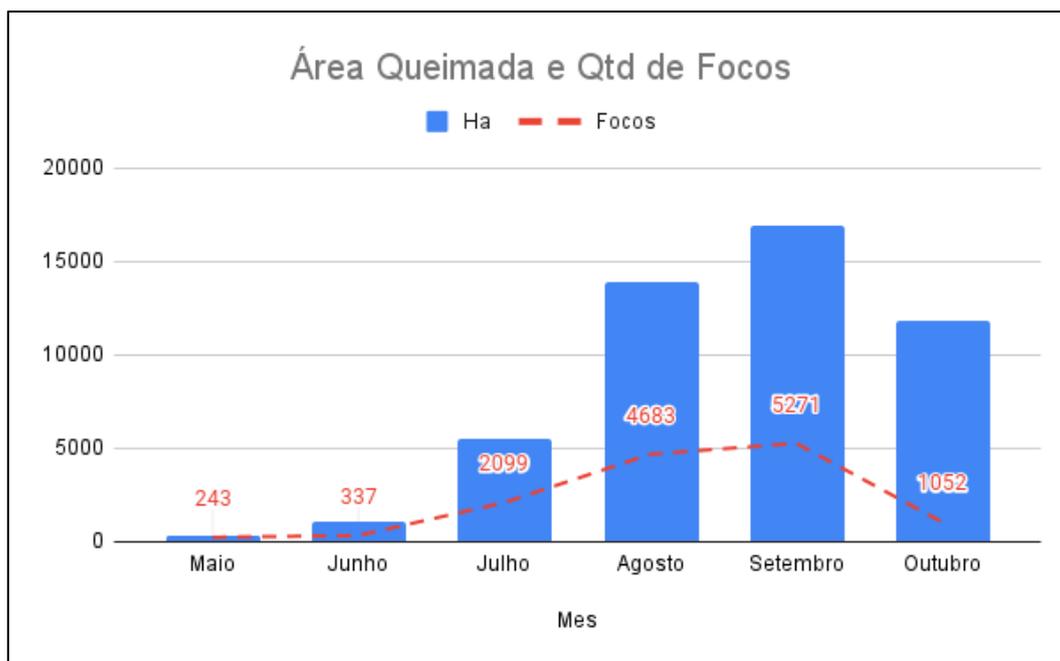


Figura 11 - Distribuição mensal dos quantitativos de área queimada inferida para área de estudo e focos de calor detectados pelo BDQ INPE.

Fonte: Os autores.

Ao se observar a extensão espacial das cicatrizes (Figura 12), os meses de agosto e setembro apresentaram os maiores acumulados bem como os maiores quantitativos de focos de calor. Esse comportamento segue o padrão do evento no cerrado maranhense, onde as queimadas são moduladas em função da interferência sazonal (SILVA JUNIOR *et al.*, 2018) e assemelha-se ao comportamento observado em 2019 (SILVA *et al.*, 2019) para a unidade de estudo. Acrescenta-se ainda que, o trimestre JUL-AGO-SET concentrou os maiores quantitativos de focos do ano de 2022 (IMESC, 2022).

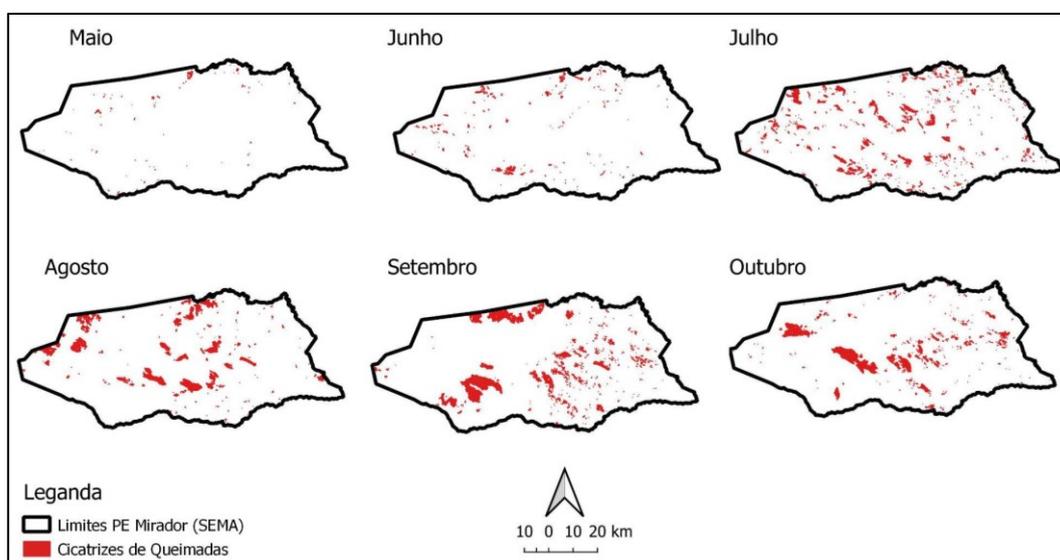


Figura 12 - Cicatrizes acumuladas mensais identificadas na área de estudo.

Fonte: Os autores.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A coleta de dados em campo permitiu observar que a área apresentou forte incidência de nuvens nos dias de campo e que esse aspecto ambiental apresentou limitação à detecção de focos ativos de calor, conforme reportado na literatura. Apesar dessa limitação, a correlação positiva forte foi aferida entre cicatrizes identificadas e os focos de calor, demonstrando a relação entre tais e que os eventos esporádicos de não-detecção de focos não se constituem fator potencial na interferência significativa dessa relação para a área de estudo.

A validação de campo apresenta-se como uma tarefa que coopera positivamente para identificação de evidências de queimadas que não foram possíveis de serem identificadas quando a ocorrência está ativa pelos sistemas registradores de larga escala, mas que podem ser detectados através da metodologia proposta.

Os resultados de cicatrizes obtidas pela cadeia de processos apresentados, mostra-se de acordo com as tendências sazonais do evento de queimada, de modo que a correlação com os focos foi positiva e que, por tanto, uma inferência da área queimada durante os meses estudados, é adequada.

A metodologia apresentada, composta por diferentes etapas e procedimentos combinando etapas automáticas, semiautomáticas e manuais, além de se mostrar robusta quanto à capacidade de processamento de dados e etapas, pode aferir com grande refinamento a distribuição das queimadas dentro da área de estudo. Tal afirmativa se deve ao fato de o percentual de acerto obtido na validação automática e semiautomática ter atingido o valor de 90.23%.

Outros trabalhos devem ser conduzidos visando o comparativo com outros produtos de queimadas existentes, tais como Map Biomas Fogo (até o fechamento deste trabalho, apenas a série temporal até 2020 estava disponível) e Esa Fire CC51 (até a data desta publicação, apenas a série temporal até 2021 estava disponível). Além disso, outros trabalhos são encorajados para uma avaliação da recorrência do fogo em coberturas vegetais específicas na área de estudo.

Este trabalho, além de exigível a longo prazo por conta do estabelecimento de rotina python em ambiente SIG, mostra-se gerador de dados importantes para gestão da unidade, permitindo aferir a extensão espacial das áreas atingidas pelo fenômeno anualmente e possibilitando analisar a recorrência destas.

AGRADECIMENTOS

Os autores da pesquisa agradecem à Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais do Maranhão (SEMA), à Superintendência de Biodiversidade e Áreas Protegidas (SBAP/SEMA) e ao Fundo da Biodiversidade Brasileira (FUNBIO) pelo apoio logístico, infraestrutura e financeiro nos trabalhos de campo que culminaram na realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C.; SHIMABUKURU, Y. E. Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira. *Acta Amazônica*, Manaus, v. 35, n. 4, p. 445 – 456, 2005.

ARRUDA, V. L. S. **Mapeamento de Cicatrizes de Áreas Queimadas no Cerrado, Usando Imagens LANDSAT, Google Earth Engine e Deep Learning**. 2021. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Brasília, Brasília, 2021.

CALDAS, J. M.; SILVA, F. B.; LEITE JÚNIOR, C. H. Análise de focos de queimadas no parque estadual do mirador utilizando um sistema de informação geográfica – sig, estado do maranhão, brasil. In: SAFETY, HEALTH AND ENVIRONMENT WORLD CONGRESS,14., 2014, Cubatão. *Anais...* Cubatão, 1996. p. 134-138.

CORRÊA, C. R.; ALENCAR, R. C. C. Focos de queimadas em unidades de conservação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 16., 2013, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu, 2013. p. 3954-3961.

FROST, P. G. H.; ROBERTSON, F. The ecological effects of fire in savannas. In: WALKER (Ed.). **Determinants of Tropical Savannas**. Oxford: IRL Press, 1987. p. 93-140.

GONTIJO, G. A. B. *et al.* Detecção de queimadas e validação de focos de calor utilizando produtos de Sensoriamento Remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 15., 2011, Natal. *Anais...* Natal, 2011. p. 7966-7993.

HENRIQUES, R. P. B.; HAY, J. D. Patterns and dynamics of plant populations. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (Ed.). **Cerrados of Brazil**. New York: Columbia University Press, 2002. p. 140-158.

HERNANDEZ, T. P. **Resposta Espectral da Vegetação Desidratada e Valores de NBR (Normalized Burn Ratio) obtidos via dados MSI/SENTINEL – 2 em Regiões Tropicais**. 2021. 51 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estado do Maranhão. Vegetação**. Goiás, 2011. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/vegetacao/mapas/unidades_da_federacao/ma_vegetacao.pdf. Acesso em: 14 fev. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Programa Queimadas**. INPE, Perguntas frequentes. São José dos Campos, 2022. Disponível em: <http://www.inpe.br/queimadas/portal/informacoes/perguntas-frequentes>. Acesso em: 01 fev. 2023.

INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONOMICOS E CARTOGRAFICOS (IMESC). **Boletim Trimestral de Focos de Calor no Maranhão: 3º Trimestre 2022**. São Luís, 2022. Disponível em: <https://imesc.ma.gov.br/src/upload/publicacoes/e76901832>. Acesso em: 24 fev. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Banco de dados de queimadas**. Disponível em: <http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas>. Acesso em: 30 jan. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Boletim Mensal de Monitoramento e Risco de Queimadas e Incêndios Florestais**. v. 6, n. 5, 2021. Disponível em: Boletim Infoqueima Maio/2021 (inpe.br). Acesso em: 25 jan. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Boletim Mensal de Monitoramento e Risco de Queimadas e Incêndios Florestais**. v. 6, n. 6, 2021. Disponível em: Boletim Infoqueima Junho/2021 (inpe.br). Acesso em: 25 jan. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Boletim Mensal de Monitoramento e Risco de Queimadas e Incêndios Florestais**. v. 6, n. 7, 2021. Disponível em: Boletim Infoqueima Julho/2021 (inpe.br). Acesso em: 25 jan. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Boletim Mensal de Monitoramento e Risco de Queimadas e Incêndios Florestais**. v. 6, n. 9, 2021. Disponível em: Boletim Infoqueima Setembro/2021 (inpe.br). Acesso em: 25 jan. 2023.

KEY, C. H.; BENSON, N. The Normalized Burn Ratio (NDBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity. **International Journal of Wildland Fire**, v. 9, n. 1, p. 1-14, 1999.

KOUTSIAS, N.; KARTERIS, M. Logistic regression modelling of multitemporal Thematic Mapper data for burned area mapping. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, p. 3499–3514, 1998.

LEMOS, D. C.; TAROUÇO, J. E. Geomorfologia ambiental do alto itapecuru. Parque estadual de mirador – MA. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA. 9., 2012, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2012. p. 5.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, p. 1425-1432, 1996.

NASCIMENTO, D. T. F.; NOVAIS, G. T. Clima do Cerrado: dinâmica atmosférica e características, variabilidades e tipologias climáticas. *Élisée* - **Revista de Geografia da UEG**, v. 9, n. 2, p. 9-22, 2020.

OLIVEIRA, M. T. *et al.* Mapeamento da Vegetação do Cerrado - Uma Revisão das Iniciativas de Sensoriamento Remoto. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, p. 1250-1274, 2020.

PEREIRA JÚNIOR, A. C. **Monitoramento de Queimada na região dos Cerrados utilizando dados AVRR/NOAA corrigidos por dados TM/LANDSAT**. 1992. 199 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992.

PEREIRA, A. A. *et al.* Quantificação de áreas queimadas em unidades de conservação de Minas Gerais através do processamento de imagens TM Landsat 5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal, 2009. p. 6045-6052.

PEREIRA, A. A. **Mapeamento automático de queimadas no Bioma Cerrado utilizando sensores orbitais**. 2017. 215 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

PEREIRA, A. C.; SETZER, A. W. Comparison of fire detection in savannas using AVHRR's channel 3 and TM images. **International Journal of Remote Sensing, Basingstoke**, v. 17, n. 10, p. 1925-1937, 1996.

PRUDENTE, T. D.; ROSA, R. Detecção de incêndios florestais no parque nacional da chapada dos veadeiros e área de entorno. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 11, n. 35, p. 209–221, 2010.

ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. 2. ed. Uberlândia: EDUFU, 2009. 264p.

ROUSE, J. W. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation**. NASA/GSFC, 1974. 371p.

ROZA, W. S. S.; RIBEIRO, S. R. A. Detecção e estimativa de área queimada entre o limite do Parque Estadual de Vila Velha – PR e sua zona de amortecimento mediante sensoriamento remoto. **Sociedade e Território**, Natal, v. 25, n.1, p. 102–118, 2013.

SECRETARIA DO ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS DO MARANHÃO. **Atlas Geográfico do Parque Estadual do Mirador**. São Luís: SEMA, 2018. 1 CD-ROOM.

SILVA JÚNIOR, C. H. L. *et al.* Dinâmica das Queimadas no Cerrado do Estado do Maranhão, Nordeste do Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 35, p. 1-14, 2018.

SILVA, F. S.; PESTANA, A. L. M.; MARTINS, L. S. Sensoriamento remoto para detecção de queimadas no cerrado maranhense: uma aplicação no parque estadual do mirador. **Revista Geográfica Acadêmica**, Paricarana, v. 13, n. 12, p. 90-105, 2019.

TEOBALDO, D.; BAPTISTA, G. M. M. Quantificação do Grau de Severidade de Queimada em Unidades de Conservação no Distrito Federal por meio dos Índices Espectrais dNBR e RdNBR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2013. p. 6534–6540.

TRIGG, S.; FLASSE, S. An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. **International Journal of Remote Sensing, Basingstoke**, v. 22, n. 13, p. 2641-2647, 2001.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Landsat Collection 2 Quality Assessment Bands**. Virgínia, 2023. Disponível: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-quality-assessment-bands>. Acesso em: 13 fev. 2023.

Recebido: 25.02.2023

Aceito: 06.06.2023