

# **O uso dos índices espectrais NBR e $\Delta$ NBR empregando dados Sentinel 2 para identificar e delimitar áreas queimadas, utilizando como modelo uma área do Pantanal de Nhecolândia, Mato Grosso do Sul**

## **The use of NBR and $\Delta$ NBR spectral indices using Sentinel 2 data to identify and delimit burned areas, using as a model an area of the Pantanal of Nhecolândia, Mato Grosso do Sul**

**Rennan Vilhena Pirajá<sup>\*</sup>, Ademir Kleber Morbeck de Oliveira<sup>\*\*</sup>, Rosemary Matias<sup>\*\*\*</sup>, Ary Tavares Rezende Filho<sup>\*\*\*\*</sup>**

<sup>\*</sup> Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional, Universidade Anhanguera-Uniderp, rennanvilhena345@gmail.com

<sup>\*\*</sup> Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional, Universidade Anhanguera-Uniderp, akmorbeckoliveira@gmail.com

<sup>\*\*\*</sup> Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional, Universidade Anhanguera-Uniderp, rosematiasc@gmail.com

<sup>\*\*\*\*</sup> Faculdades de Engenharia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, ary.rezende@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v56i0.85434>

### **Resumo**

O Pantanal vem sendo atingido pelas piores secas na última década, além de incêndios florestais significativos que ameaçam a biodiversidade e as populações locais. Levando-se em consideração sua rica biodiversidade, objetivou-se realizar a análise e monitoramento do grau de severidade das queimadas, por meio da mensuração dos danos causados por incêndios florestais, em outubro de 2021, na Fazenda São Roque, localizada na área mais rica em ambientes heterogêneos do Pantanal: a Nhecolândia. Os procedimentos metodológicos utilizaram os índices espectrais de queimadas Normalized Burn Ratio (NBR) e o Delta Normalized Burn Ratio ( $\Delta$ NBR), para avaliar os impactos ambientais ocorridos. Os resultados obtidos indicaram que a utilização das imagens do satélite Sentinel 2, na composição RGB, falsa-cor das bandas 12, 08 e 04, e o mapa de Grau de Severidade das Queimadas foram eficientes na identificação e análise da devastação relacionada ao incêndio ocorrido na propriedade. O uso destes índices permitiu distinguir as variações do incêndio florestal por intensidade de suas cicatrizes, além de sua quantificação. A aplicação dos índices também destacou de forma eficiente, no mapa temático de Grau de Severidades das Queimadas  $\Delta$ NBR, as áreas não queimadas, como as lagoas, das áreas atingidas pelo fogo, sendo necessário apenas o ajuste na legenda para as classes “Alta Regeneração” por “Superfície Hídrica” e “Baixa Regeneração” por “Fitomassa Aquática”. Deste modo, a metodologia foi eficiente na avaliação dos danos causados por incêndios em regiões alagadas, permitindo identificar e quantificar tais eventos, tornando

possível o mapeamento, de incêndios florestais e direcionando ações de monitoramento e recuperação de áreas afetadas.

**Palavras-chaves:**

Sensoriamento remoto; Geotecnologias; Incêndios florestais; Áreas alagadas.

**Abstract**

The Pantanal has been hit by the worst droughts in the last decade, in addition to significant forest fires that threaten biodiversity and local populations. Taking into account its rich biodiversity, the objective was to analyze and monitor the degree of severity of the fires, by measuring the damage caused by forest fires, in October 2021, at the São Roque farm, located in the richest area in heterogeneous environments of the Pantanal: Nhecolândia, using the spectral indices of fires Normalized Burn Ratio (NBR) and Delta Normalized Burn Ratio ( $\Delta$ NBR). The results obtained indicated that the use of images from the Sentinel 2 satellite, in the RGB composition, false-color of bands 12, 08 and 04, and the map of Severity Degree of Queimadas were efficient in the identification and analysis of the devastation related to the fire in the property. The use of these indices made it possible to distinguish forest fire variations by the intensity of their scars, in addition to allowing their quantification. The application of the indices also efficiently highlighted, in the thematic map of Degree of Severity of the Queimadas  $\Delta$ NBR, the unburned areas, such as the ponds, of the areas affected by the fire, requiring only the adjustment in the legend for the classes "High Regeneration" by "Water Surface" and "Low Regeneration" by "Aquatic Phytomass". In this way, the methodology was efficient in assessing the damage caused by fires in flooded regions, allowing the identification and quantification of such events, making it possible to map forest fires, directing monitoring and recovery actions in areas affected.

**Keywords:**

Remote sensing; Geotechnologies; Forest fires; Flooded areas.

**I. INTRODUÇÃO**

Os impactos ambientais causados por queimadas ou incêndios florestais podem ser caracterizados em diversas escalas, sendo que em âmbito local destroem a fauna e flora, empobrecem o solo, reduzem a penetração de água no subsolo, e em muitos casos causam mortes, acidentes e perda de estruturas físicas nas propriedades (PIRAJÁ et al., 2023).

No âmbito regional, causam poluição atmosférica que pode ser sentida a quilômetros de distância e impactam ecossistemas (GONÇALVES, 2021). Na escala global, podem alterar a composição química da atmosfera, contribuindo com as mudanças climáticas e o aquecimento global (INPE, 2020). Neste sentido, as queimadas nos biomas são responsáveis por grande parte das emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para a atmosfera (MARENGO et al., 2010).

Por estes motivos, o histórico de queimadas em florestas, campos e pastagens no Brasil já vem sendo estudado por diversos cientistas e instituições de pesquisa, que apontam evidências dos impactos causados por estes eventos socioambientais principalmente nos biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal. O aumento destes fenômenos vem sendo observado nas últimas décadas e o ano de 2020 foi marcado pela maior seca nos últimos 50 anos e por uma sequência de incêndios registrados nas já fragmentadas paisagens dos biomas brasileiros.

Com uma superfície de 152 389 km<sup>2</sup> (PARANHOS FILHO et al., 2014), o Pantanal é considerado uma das maiores planícies de inundação do planeta, perdendo no Brasil apenas para a região da floresta amazônica (KEDDY et al., 2009). A planície pantaneira recebe águas e sedimentos de cerca de 90 cursos d'água, sendo os maiores os rios Paraguai, Cuiabá, São Lourenço, Vermelho, Piquiri, Correntes, Taquari, Negro, Aquidauana, Miranda, Nabileque, Tereré e Branco (REZENDE-FILHO et al., 2012).

Estas áreas úmidas, chamadas *wetlands*, contribuem para a criação de grandes pontos de biodiversidade e o Pantanal, por sua localização na parte central da América do Sul e influência dos biomas Amazônia, Cerrado, Chaco e Mata Atlântica, forma um ambiente único (Pott et al., 2011). A grande diversidade ambiental permite heterogeneidade, com fitofisnomias que originam distintos mosaicos de paisagens que formam as sub-regiões do bioma, conhecidas por diferentes nomes, tais como Pantanal de Miranda, Pantanal de Poconé, Pantanal do Paraguai e Pantanal de Nhecolândia, entre outros (PARANHOS FILHO et al., 2014).

Embora seja uma planície de inundação, o Pantanal também está sujeito aos incêndios florestais, que se tornaram recorrentes na região. Nos biomas brasileiros, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) registrou pelo satélite de referência um total de 457 673 mil focos de incêndios no ano de 2020, 22 116 mil só na planície pantaneira (INPE, 2022).

Segundo as análises preliminares e os dados do Laboratório de Aplicações de Satélites Ambientais da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LASA/UFRJ), que estudaram uma série histórica anual do avanço das queimadas no Pantanal, suas causas são uma combinação de elevada temperatura, baixa umidade do ar, fortes ventos e o fator antrópico (LASA/UFRJ, 2020).

A quantidade de áreas queimadas, sua intensidade e frequência, não possuem um padrão, pois oscilam na dependência do ano e condições climáticas específicas, como precipitação e umidade do ar, além do nível de inundação. Segundo dados do Lasas/UFRJ, a área queimada caiu 66,8% de 2020 para 2021, com 1 283 950 ha queimados em 2021 – diante de 3 878 650 ha que foram contabilizados no mesmo período do ano em 2020. Neste contexto, a área afetada no estado de Mato Grosso do Sul em 2021, até o dia 21 de novembro, chegou a 874 500 ha, 48,2% menor do que os 1 689 325 registrados no mesmo período em 2020 (BRONZE, 2021).

Os incêndios florestais e os eventos de queimadas excessivos trazem uma série de prejuízos ambientais, sociais e econômicos, sendo necessário a utilização de diferentes instrumentos para avaliar seus efeitos. Neste sentido, esta pesquisa apresenta uma metodologia que explora o potencial do satélite Sentinel 2 e os índices espectrais *Normalized Burn Ratio* (NBR) e o *Delta Normalized Burn Ratio* ( $\Delta$ NBR), aplicados a uma área do Pantanal da Nhecolândia. Esta sub-região é conhecida por apresentar diferentes fitofisionomias, como as salinas (lagoas de água salobra), capões e cordilheiras (vegetação arbórea localizada em elevações acima da planície de inundação) e, corixos e vazantes (canais de drenagem), entre outras feições fisionômicas (REZENDE-FILHO et al., 2012).

Levando-se em consideração a importância ecológica e econômica do Pantanal, objetivou-se analisar o grau de severidade das queimadas, por meio da utilização dos índices espectrais de queimadas *Normalized Burn Ratio* e o *Delta Normalized Burn Ratio*. As informações obtidas foram aplicadas em uma área selecionada, a Fazenda São Roque, localizada na porção sul do leque aluvial do rio Taquari, na sub-região do Pantanal denominado “Nhecolândia”.

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo

A região de estudo está localizada na Fazenda São Roque (11 164 ha), município de Corumbá, Mato Grosso do Sul, Pantanal da Nhecolândia (Figura 1), com uma paisagem formada por cordilheiras e capões cobertos por cerrados e matas, circundados por campos inundáveis, além da presença de lagoas permanentes e temporárias, unidas por corixos e vazantes.

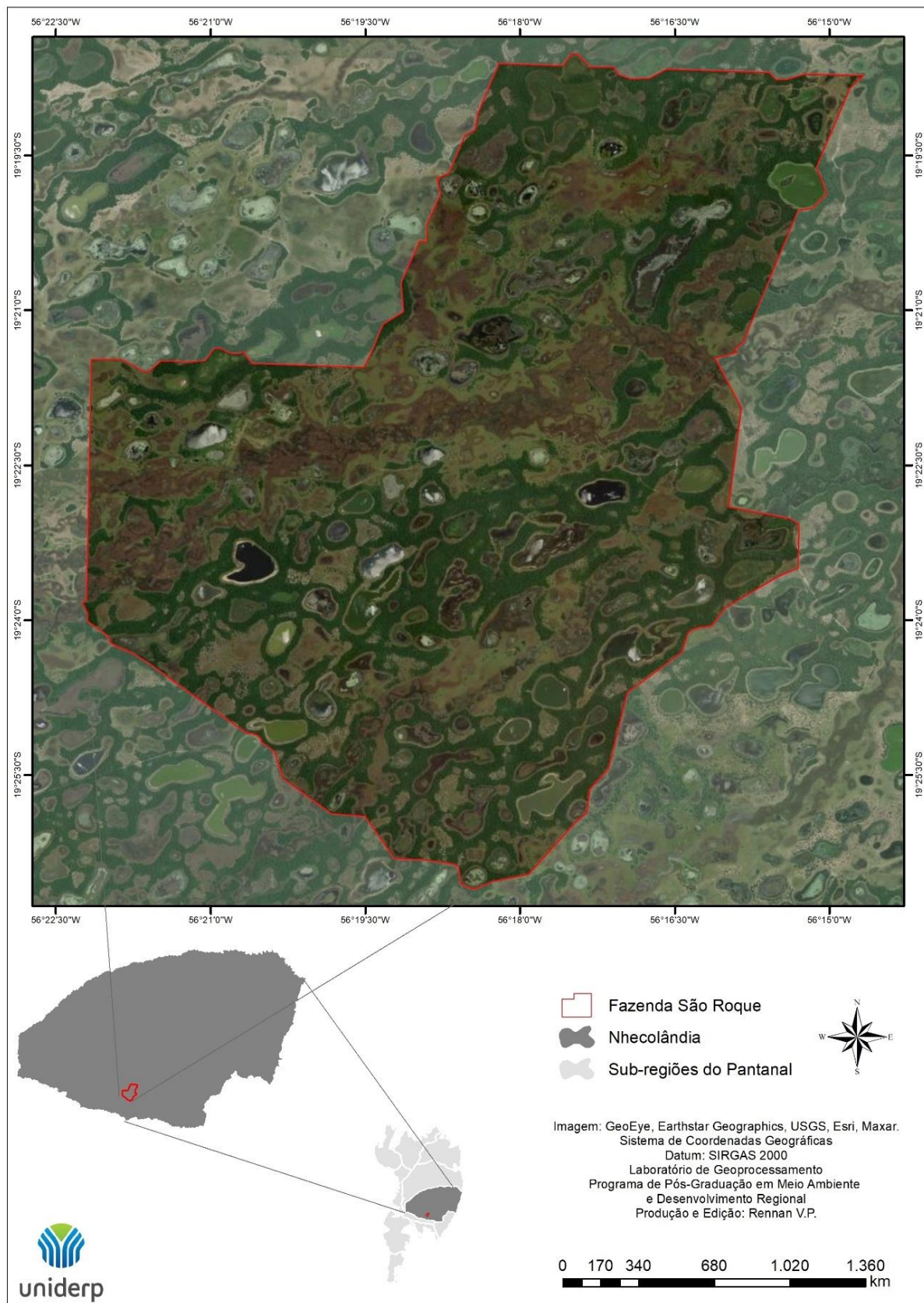


Figura 1. Mapa de localização da Fazenda São Roque, Pantanal da Nhecolândia, Mato Grosso do Sul. Fonte: org. pelos autores.

A escolha da área ocorreu devido a detecção, com dados do INPE, do primeiro foco de queimada na fazenda em 14/10/2021 e sua propagação na porção sudeste da propriedade, imageada pelo satélite Sentinel 2 no dia 15/10/2021. Este processo ocasionou um evento de queimada que se alastrou extrapolando os limites da fazenda, sendo um dos motivos para a escolha desta área para o estudo, monitoramento e a análise dos danos resultante do evento, levando-se em consideração também o acesso a propriedade e a sua heterogeneidade ambiental.

### **Espacialização dos dados de focos de incêndios**

Os dados de queimadas foram obtidos por meio do INPE - Programa Queimadas (INPE, 2020), que possui informações que identificam os focos de incêndios durante a estação seca no Pantanal, na área de interesse para a data específica. Os arquivos dos focos foram baixados no formato shapefile e inseridos no software ArcGIS 10.4 (ESRI, 2016). Os dados obtidos possuem atributos, como: quantidade e localização das queimadas e, classificação de risco de fogo, que foram espacializados na área, sendo em seguida plotados na cena do Sentinel 2, referente ao recorte e delimitação da Fazenda São Roque, para verificar a localização, início, alastramento e densidade dos pontos com incêndios.

### **Mapa de composição de bandas na falsa cor para visualizar cicatrizes de queimadas**

A pesquisa foi realizada com base nas análises e interpretações das imagens dos satélites orbitais de observação da Terra, Sentinel-2A e 2B, integrantes do Programa *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES) da *European Space Agency* (ESA). Todas as imagens utilizadas foram obtidas no website *EarthExplore* (USGS, 2015).

O processamento inicial foi realizado no software de Processamento Digital de Imagens SNAP, desenvolvido pela própria ESA para manipulação e modelagem de imagens do programa Sentinel, no qual foram georreferenciadas e feitas as correções atmosféricas seguindo a sequência: *Optical*, *Thematic Land Processing*, *Sen2cor processor* e *Sen2cor 280*, para depois serem exportadas e classificadas no software ArcGIS 10.4 (USGS, 2015; ESA, 2019).

Foram realizadas a composição de bandas R/G/B: 12 (*Short-wave infrared* - SWIR) com resolução espacial de 20 m, 08 (*Near-infrared* - NIR) com resolução espacial de 10 m e 04 (Red) com resolução espacial de 10 m. A composição foi utilizada, após a fusão das imagens e reamostragem dos pixels para 10 m de resolução, para gerar a falsa cor, que é a mais apropriada para visualizar as cicatrizes de queimadas, devido à combinação do

espectro eletromagnético, fornecendo um resultado visual menos susceptível à fumaça e à neblina geradas pelas chamas.

Estes procedimentos, de fusão e composição das bandas, realizados no ArcGIS, foram utilizados na interpretação das áreas selecionadas, constituindo a base da interpretação visual para a análise e validação dos dados. A sequência de cenas das imagens utilizadas foi: 08/10/2021 (antes do incêndio), 15/10/2021 (início do incêndio), 20/10/2021 (alastramento do incêndio no polígono da propriedade) e 25/10/2021 (depois do incêndio).

### Mapas de Índice de Queima Normalizada (*Normalized Burn Ratio*) e Delta Índice de Queima Normalizada (*Delta Normalized Burn Ratio*) com Sentinel-2

Foram realizadas as conversões dos valores das bandas espectrais de *Digital Number* (DN) para *Top Of Atmosphere* (TOA) *Reflectance*, com base em Gatti e Bertolini (2013). Após os procedimentos iniciais foi obtido o *Normalized Burn Ratio* (NBR), com as imagens Sentinel-2, para as áreas selecionadas. O NBR é um índice de normalização apropriado para visualização de cicatrizes de queimadas, onde são utilizados para seu cálculo as bandas do infravermelho próximo (banda 8) e o infravermelho de onda curta (banda 12), tendo em vista que as áreas queimadas refletem intensamente o infravermelho de onda curta e pouco o infravermelho próximo. O NBR, desenvolvido por Koutsias e Karteris (1998), foi obtido pela calculadora *Raster Calculator* do ArcGIS, utilizando a fórmula:

$$NBR = \frac{NIR-SWIR}{NIR+SWIR} \quad (1)$$

Por meio do índice NBR foi possível analisar a área de estudo antes e depois das queimadas, com os valores do índice, que variam de -1 a +1 onde, valores mais próximos de +1 referem-se a área queimada e quanto mais próximo de -1, áreas não queimadas. A obtenção do índice NBR teve o intuito de utilizar posteriormente seus dados na confecção do *Delta Normalized Burn Ratio* ( $\Delta NBR$ ), sendo que o NBR foi realizado para as cenas: 08/10/2021 (antes do incêndio) e 25/10/2021 (depois do incêndio).

O  $\Delta NBR$  é a subtração dos resultados do NBR obtido antes e logo após a queimada de uma área. O resultado desta subtração, que é um cálculo de valores espectrais de paisagens de um mesmo espaço em tempos diferentes, também foi realizado na calculadora *Raster Calculator*, sendo bastante sensível na detecção das cicatrizes de queimadas, utilizando a fórmula:  $\Delta NBR = NBR$  (antes do incêndio) –  $NBR$  (depois do incêndio).

## Mapa do grau de severidade das queimadas

Com o  $\Delta$ NBR da área queimada foi realizada a classificação para o Grau de Severidade. O intuito de se utilizar este método é diferenciar a classificação das áreas afetadas pelo fogo, como das cordilheiras e vegetação herbácea, das superfícies hídricas (lagoas) e suas margens com vegetação aquática, ao isolar a mudança provocada pela queimada na paisagem. A análise multitemporal, por meio da diferença entre o NBR de uma mesma área antes e após uma queimada, foi desenvolvido por Key e Benson (1999), onde foram atribuídos valores para a mensuração da severidade do fogo (Quadro 1).

Quadro 1. Grau de Severidade e variações dos valores do  $\Delta$ NBR

Nível de Severidade	Variação do $\Delta$ NBR
Alta regeneração	-500 – -251
Baixa regeneração	-250 – -101
Não queimado	-100 – +99
Baixa severidade	+100 – +269
Baixa moderada severidade	+270 – +439
Alta moderada severidade	+440 – +659
Severidade crítica	+660 – +1350
Anomalia	>+1350

Fonte: Key e Benson (1999).

O grau de severidade foi aplicado para a área monitorada, formando a base para compor uma nova legenda adaptada à classificação da área afetada pelo fogo. Este ajuste foi necessário tendo em vista que este índice foi aplicado a uma área úmida bastante peculiar do Pantanal, composta por diversos arranjos de espécies da flora que em função da inundação e do tipo de solo, formam um mosaico de paisagens (lagoas, salinas, cordilheiras, capões, campos, corixos e vazantes, entre outras).

Após a aplicação do índice ocorreu a necessidade de modificar as nomenclaturas da metodologia original para as classes: “Alta Regeneração” e “Baixa Regeneração” da vegetação. A modificação foi necessária levando-se em consideração que, a variação do  $\Delta$ NBR para “Alta Regeneração” corresponde as superfícies de água exposta nas lagoas, por isso denominadas “Superfície Hídrica”, enquanto a variação do  $\Delta$ NBR para “Baixa Regeneração” foi referente à margem das lagoas, com presença de plantas aquáticas emergentes e/ou flutuantes, por isso denominadas de “Fitomassa Aquática”.

## Matriz de confusão e Índice Kappa

Para a validação do mapa do Grau de Severidade, foi seguida a seguinte rotina no ArcGIS: inicialmente foram criados 2000 pontos de controle, que são amostras selecionadas na imagem Sentinel 2 referentes a cada

classe associada ao raster Delta  $\Delta$ NBR por meio da ferramenta *Create Accuracy Assessment Points*. Em seguida os pontos foram reamostrados pela ferramenta *Update Accuracy Assessment Points* utilizando o mapa classificado como Grau de Severidade das Queimadas. Após esta sequência, os dados foram inseridos na ferramenta *Compute Confusion Matrix*, assim obtendo a matriz de confusão e o índice Kappa.

O índice Kappa, segundo Congalton (1991), e a matriz de confusão, são importantes ferramentas de validação. De acordo com Silva e Paes (2012), o índice Kappa é um método estatístico para avaliar o nível de concordância ou reprodutibilidade entre dois conjuntos de dados e quanto mais próximo de 1 for o valor, maior é o indicativo de que existe uma concordância entre os dados gerados; quanto mais próximo de zero, maior é o indicativo de que a concordância é puramente aleatória.

Segundo Nascimento et al. (2016), a matriz de confusão e o índice Kappa representam a qualidade de um mapa gerado por uma classificação, sendo uma das técnicas que validam o processamento digital de imagem. O coeficiente Kappa é o índice que melhor representa a concordância dos dados, nos quesitos precisão e confiabilidade da classificação, sendo o índice obtido neste trabalho classificado conforme os parâmetros estabelecidos por Fonseca (2000) (Quadro 2).

Quadro 2. Parâmetros do coeficiente Kappa

Valores de kappa	Interpretação
< 0	Sem concordância
0 – 0,19	Pouca concordância
0,2 – 0,39	Concordância razoável
0,4 – 0,59	Concordância média
0,6 – 0,79	Concordância considerável
0,8 – 1,0	Concordância excelente

Fonte: Fonseca (2000).

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A sequência temporal das cenas (Figura 2) demonstra a evolução da queimada (08/10/21 - antes do início da queimada; 15/10/2021 - início da queimada, apresentando os focos de incêndios concentrados a sudeste da propriedade; 20/10/2021 - avanço do incêndio, com vários focos ativos na porção oeste e sudoeste da fazenda; e, 25/10/2021, demonstra a devastação da queimada sem a presença de focos de fogo ativos).

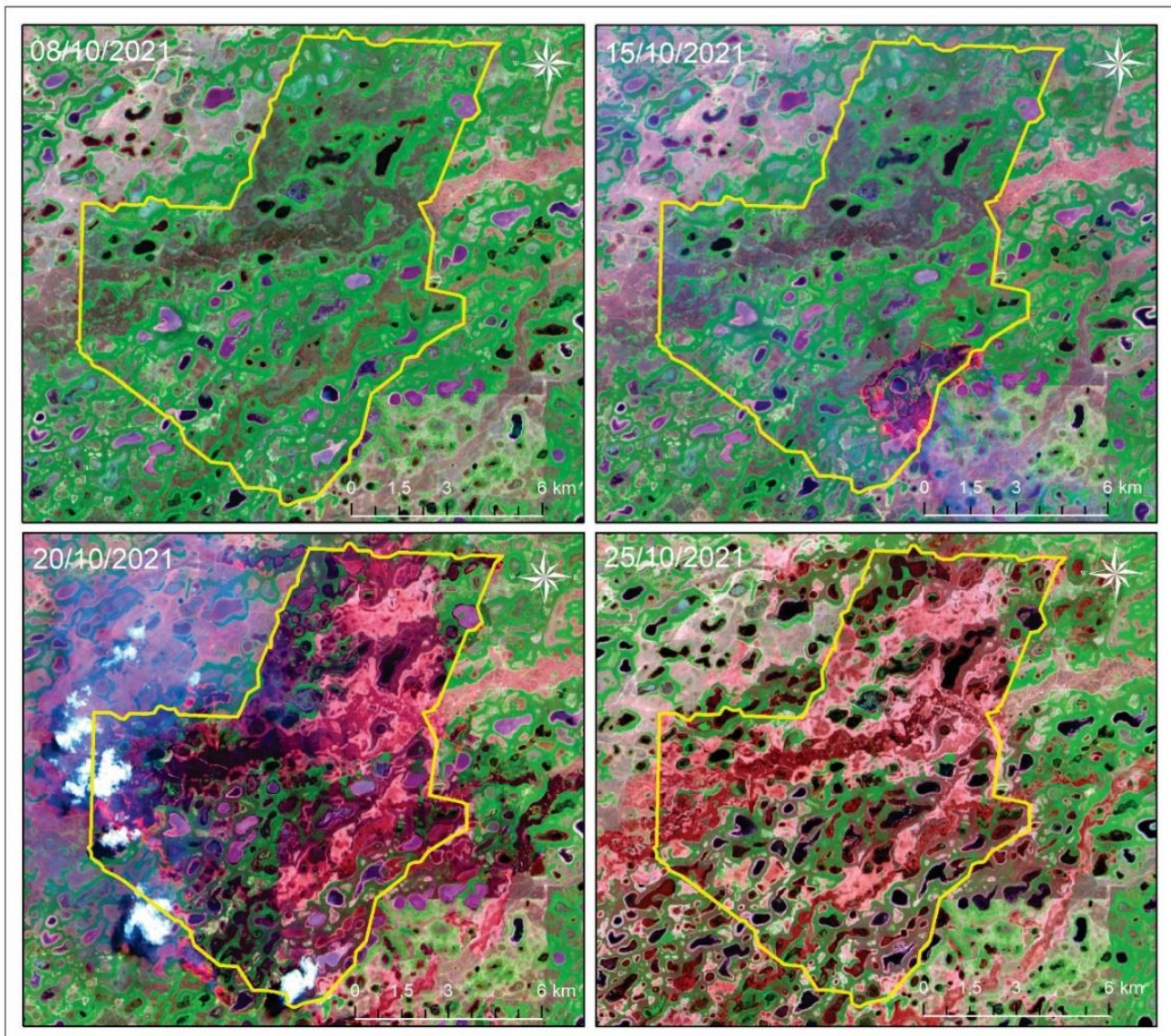


Figura 2. Sequência temporal da evolução do incêndio. O polígono em amarelo representa a delimitação da Fazenda São Roque, Pantanal de Nhecolândia, Mato Grosso do Sul. Fonte: org. pelos autores.

Os prejuízos ambientais gerados em decorrência das queimadas no bioma afetam diretamente a dinâmica da região e indiretamente a sociedade como um todo, contribuindo com efeitos que vão desde a poluição atmosférica, vulnerabilidade dos solos à erosão, poluição hídrica e a redução da biodiversidade. Os impactos negativos não afetam apenas a vegetação nativa, mas também exemplares da fauna regional (Figura 3), refletindo na perda de aves, pequenos e grandes mamíferos, por exemplo, durante as queimadas (morte por fogo e fumaça) e após a queimada, devido à redução de hábitat e alimento, resultando em prejuízos ambientais.

De acordo com Viganó et al. (2018), a ocorrência de queimadas no Pantanal é uma séria ameaça à conservação da biodiversidade, causando prejuízos à manutenção dos processos ecológicos, com resultados que afetam a própria manutenção do ecossistema.



Figura 3. Registros fotográficos realizados no dia 16/10/2021, um dia após o início do incêndio na Fazenda São Roque, Pantanal de Nhecolândia, Mato Grosso do Sul. Fonte: Genivaldo de Oliveira Xavier (org. pelos autores).

Além da ocorrência de incêndios naturais, correlacionados as condições climáticas, que vem caracterizando o aumento significativo dos incêndios no Pantanal, devido à escassez hídrica, Fiedler et al. (2006) destacaram como causas o uso incorreto do fogo para desmatamento, renovação de pastagens, abertura de novas áreas para a agropecuária, controle de pragas, produção de carvão e negligência antrópica.

Entre as consequências provenientes dos incêndios está a degradação florestal, conceito adotado por Simula (2009), que o distingue de desmatamento, explicando que este é associado à conversão da floresta para outros usos da terra, enquanto que a degradação está relacionada à combinação de distúrbios gerados na floresta pela exploração seletiva e fogo, correspondendo a respostas espectrais possíveis de serem analisadas por sensores remotos (Figura 3).

O NBR obtido com a cena de 08/10/21 (antes do fogo) representou com detalhes a paisagem no interior da propriedade, distinguindo a vegetação das cordilheiras e dos campos (valores máximos do índice) das

superfícies de solo exposto (valores médios) e lagoas (valores mínimos). O NBR obtido no dia 25/10/21 (depois do fogo) também representou detalhes da paisagem e com bastante intensidade, os valores mínimos do índice para os focos de incêndio, corroborando com os valores encontrados na zona limnética.

Neste sentido, os valores mínimos encontrados na zona limnética aproximam-se dos valores dos focos de incêndio, o que limita essa metodologia quando aplicada em áreas que contenham corpos hídricos. Essa característica é devida as superfícies hídricas absorverem a maior parte da energia eletromagnética, apresentando baixa reflectância, principalmente em ambientes lânticos, que apresentam baixa influência de sedimentos em suspensão, consequentemente apresentando valores quase nulos no infravermelho.

No entanto, levando em consideração a presença de plantas aquáticas emersas e flutuantes, assim como o fitoplâncton nas zonas limnéticas das lagoas, destaca-se o potencial do uso da banda do infravermelho próximo ao permitir a visualização de áreas ocupadas com macrófitas aquáticas (ALMEIDA et al., 2009). Já o uso do infravermelho de ondas curtas, por não apresentar resposta espectral para a presença de vegetação fotossinteticamente ativa (REZENDE FILHO et al., 2012), potencializa o contraste obtido quando aplicado as cenas antes e depois do fogo por meio do Delta  $\Delta$ NBR, fornecendo resultado satisfatório ao evidenciar as lagoas e diferenciá-las das superfícies atingidas pelas queimadas.

O Mapa do Grau de Severidade das Queimadas ou Delta NBR foi obtido pela subtração do NBR de 08/10/21 (antes do fogo) pelo NBR de 25/10/21 (depois do fogo), com os valores dos índices ajustados com base na classificação de Key e Benson (1999). Apesar desta classificação ter sido desenvolvida com as bandas 7 (infravermelho médio) e 4 (infravermelho próximo) do satélite Landsat 5 Thematic Mapper e aplicados com base nos estudos sobre os incêndios ocorridos no Parque Nacional Glacier, Montana, Estados Unidos da América, em 1994, ou seja, em ambiente diferente do Pantanal, a metodologia referente as cicatrizes de queimadas revelaram as classes de severidade de danos. Desta forma, a metodologia é aplicável em diversas situações ambientais.

Pode-se avaliar que a aplicação do índice  $\Delta$ NBR às classes de paisagens, possibilitou a definição e distinção das superfícies lacustres e as cicatrizes de queimadas, de acordo com suas variações de intensidade de danos. No entanto foi necessário o ajuste na nomenclatura de duas classes da legenda proposta por Key e Benson (1999), substituindo as classes “Alta Regeneração” e “Baixa Regeneração” por “Superfície Hídrica” e “Fitomassa Aquática”, respectivamente, sendo importante estudos mais detalhados sobre a aplicação do índice nas lagoas da Nhecolândia, devido sua dinâmica e complexidade (Figura 4).

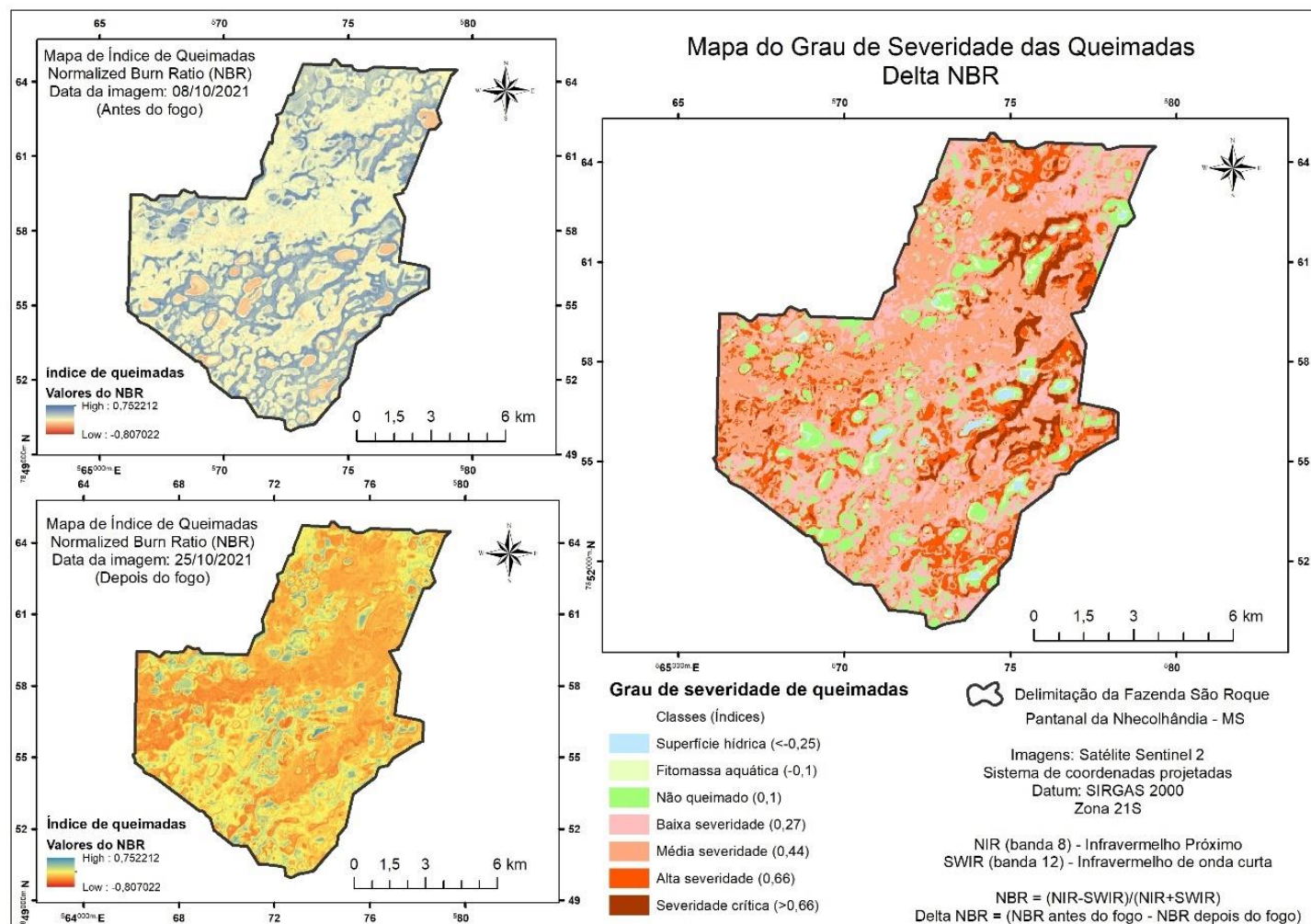


Figura 4. Mapas dos Índices de Queimadas e Grau de Severidade das queimadas para as datas de 08/10/2021 e 15/10/2021, Fazenda São Roque, Pantanal de Nhecolândia, Mato Grosso do Sul. Fonte: org. pelos autores.

Melo e Martins (2019), ao avaliarem os índices espectrais NDVI, EVI, MIRBI, NBR e dNBR quanto à delimitação de cicatrizes de incêndios no Parque Nacional de Brasília (bioma Cerrado), com imagens do satélite Sentinel-2, concluíram que o dNBR e o EVI (*Enhanced Vegetation Index*) foram os índices que obtiveram melhores resultados quantitativos e qualitativos, mais próximos da realidade. Este resultado é relacionado ao fato de os índices terem delimitado as cicatrizes de incêndio e feito a distinção das áreas queimadas e dos corpos hídricos.

Os resultados apresentados por Rosan e Alcântara (2015) ao aplicar o  $\Delta NBR$  em uma zona de tensão ecológica entre diferentes tipos de vegetação, caracterizadas como Florestas Ombrófilas e Florestas Estacionais, com enclaves entre Savanas e Florestas Estacionais, Mato Grosso, permitiram concluir que o índice apresentou um ótimo desempenho na detecção de áreas queimadas e severidade do fogo, com índice Kappa classificado

como excelente. Entretanto, os autores relatam algumas confusões com áreas úmidas, sendo minimizadas após a aplicação do NDWI (*Índice de Água de Diferença Normalizada*) e edição matricial.

Após a quantificação de todas as áreas classificadas do mapa de Grau de Severidade de Queimadas  $\Delta$ NBR, observou-se com o somatório das classes atingidas pelo fogo que a Fazenda São Roque teve um percentual de 86,33% de sua propriedade incendiada. Já o somatório para as classes não atingidas pelo fogo, como “Superfície Hídrica”, “Fitomassa Aquática” e “Não Queimado”, representaram juntas o percentual de 13,67%, evidenciando o dano a propriedade (Tabela 1).

Tabela 1. Quantificação das classes do Grau de Severidade das Queimadas, Fazenda São Roque, Pantanal de Nhecolândia, Mato

Grosso do Sul		
Classes	Area km <sup>2</sup>	Percentual (%)
1. Superfície Hídrica	1,02	0,90
2. Fitomassa Aquática	1,77	1,58
3. Não Queimado	12,48	11,19
4. Baixa Severidade	31,04	27,81
5. Média Severidade	43,62	39,08
6. Alta Severidade	16,92	15,15
7. Severidade Crítica	4,79	4,29
Total	111,64	100,00

Fonte: org. pelos autores.

A classe “Superfície Hídrica” foi a menos expressiva na quantificação, representando apenas 0,9% da área da propriedade, com valores espectrais abaixo de -0,25, representando as porções de água nas lagoas que não estão cobertas por vegetação aquática. A área correspondente a classe “Fitomassa Aquática” é a segunda menor, com 1,58% da área e valores espectrais de -0,1, referentes as porções das lagoas que possuem plantas aquáticas emergentes ou flutuantes, sendo bem representadas pelo índice  $\Delta$ NBR.

A área classificada como “Não Queimado” foi 11,19%, com valores espectrais de 0,1, correspondendo também ao interior das lagoas e a plantas aquáticas emergentes ou flutuantes e áreas de capões e campos úmidos, geralmente ao redor das lagoas.

Entre as áreas atingidas pelo fogo, a classe com a maior área afetada foi “Média Severidade”, com 39,08% da propriedade e 0,44 de valor espectral, referente principalmente aos campos. A segunda classe mais representativa, entre as áreas atingidas pelo fogo, foi “Baixa Severidade”, com 27,81% da propriedade e valores espectrais de 0,27, representando em grande parte solo já exposto, capões e corixos intermitentes (secos).

A classe “Alta Severidade” representou 15,15%, com valores espectrais de 0,66, espalhando-se por vários setores da área (Figura 5). Porém observou-se em grande parte a concentração desta classe acompanhando a

classe “Severidade Crítica”, geralmente associada as áreas onde existia maior concentração de biomassa. A classe “Severidade Crítica” foi a menor classe, entre as áreas queimadas. No entanto, apresenta os maiores danos ambientais, representando 4,29% de área atingida, com valores espectrais acima de 0,66. Observou-se pelo padrão dessa classe nas imagens que as áreas correspondentes foram as cordilheiras, onde a concentração de biomassa, composta por cerradões e matas é maior.

As cordilheiras e capões são um refúgio da fauna, com vegetação arbórea que fornece proteção e alimento para várias espécies animais. Sua perda e/ou degradação, por meio de queimadas, é um grande prejuízo ambiental para a manutenção do ecossistema.

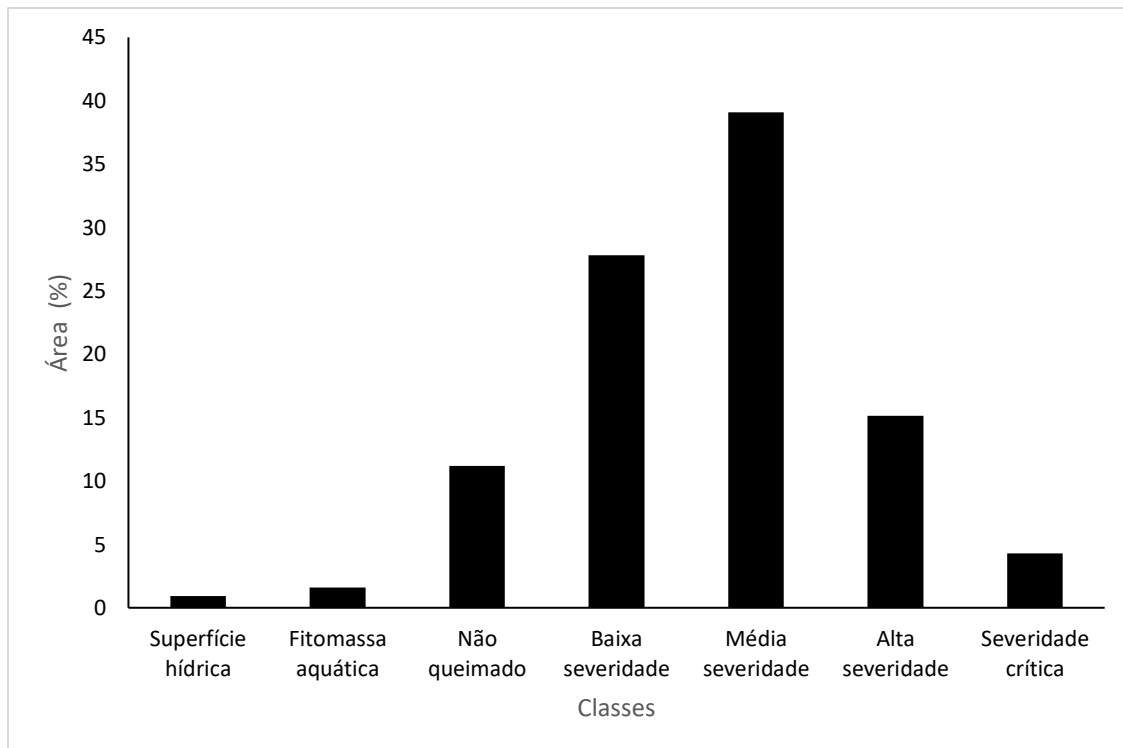


Figura 5. Quantificação das classes de Grau de Severidade das Queimadas em 25/10/21, Fazenda São Roque, Pantanal de Nhecolândia, Mato Grosso do Sul. Fonte: org. pelos autores.

O padrão de classificação do Mapa do Grau de Severidade de Queimadas apresentou-se satisfatório, tendo a matriz de confusão como resultado o valor aproximado do índice Kappa de 0,86 (Tabela 2). Este valor está relacionado a correta classificação das áreas queimadas, tendo em vista serem as maiores áreas do polígono de estudo. No entanto, o uso de outros parâmetros e métodos de validação poderão trazer melhores estimativas e confiabilidades ao estudo. O valor de  $k \sim 0,86$ , considerado excelente ( $0,8 < k \leq 1,0$ ), segundo a

classificação de Fonseca (2000), demonstra o potencial de classificação das cicatrizes de queimadas por meio do  $\Delta$ NBR.

Tabela 2. Matriz de confusão da classificação da imagem raster  $\Delta$ NBR, Fazenda São Roque, Pantanal de Nhecolândia, Mato Grosso do Sul

Classes	1	2	3	4	5	6	7	T	Ac	K
1	18	0	0	0	0	0	0	18	1	0
2	0	28	4	0	0	0	0	32	0,87	0
3	0	4	207	13	2	0	0	226	0,91	0
4	0	1	16	497	42	0	0	556	0,89	0
5	0	0	1	46	683	46	0	776	0,88	0
6	0	0	0	0	12	285	9	306	0,93	0
7	0	0	0	0	0	3	83	86	0,96	0
T	18	33	228	556	739	334	92	2000	0	0
Ac	1	0,84	0,90	0,89	0,92	0,85	0,90	0	0,90	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,86

T (Total de Pontos amostrais); Ac (Acurácia Global x100 = 90%); K (Kappa x100 = 86%); 1. Superfície hídrica; 2. Fitomassa aquática; 3. Não queimado; 4. Baixa severidade; 5. Média severidade; 6. Alta severidade; 7. Severidade crítica.

Fonte: org. pelos autores.

Deste modo, o Mapa do Grau de Severidade de Queimadas é um instrumento adequado para avaliar os impactos, com potencial de indicar quais os locais apresentam maior dano ambiental. Levando-se em consideração que o Pantanal, no período de estiagem, possui condições favoráveis para incêndios de grande magnitude, como o que aconteceu na Fazenda São Roque, fator relacionado a diversos fatores climáticos, como alta temperatura, vento e baixa umidade relativa do ar, o problema das queimadas tende a se agravar.

Neste sentido, o incentivo ao uso das técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao mapeamento de florestas degradadas por queimadas torna-se de extrema importância em um cenário de tendência de secas mais intensas na região, resultado das mudanças climáticas globais.

#### IV. CONCLUSÃO

O método utilizado foi eficiente na identificação, evolução e análise da devastação causada pelo incêndio ocorrido na região. Seu uso permitiu distinguir as variações da severidade das queimadas por intensidade de suas cicatrizes, além de permitir a quantificação destas áreas. A aplicação do  $\Delta$ NBR também destacou de forma eficiente as áreas não queimadas, como as lagoas inseridas em áreas atingidas pelo fogo, conforme demonstrado no mapa temático de Grau de Severidade de Queimadas.

Em contrapartida, a aplicação apenas do índice NBR, na imagem pós-fogo, por não ter feito a distinção da superfície hídrica com áreas afetadas pelo fogo, caracterizou-se como ineficiente quando aplicado a uma área úmida, como o Pantanal. No entanto, com a subtração das duas imagens classificadas, pré-fogo e pós-fogo, respectivamente, permitiu-se avaliar o bom desempenho da classificação com o  $\Delta$ NBR, sendo necessário apenas o ajuste da legenda de grau de severidades para as classes “Alta Regeneração” por “Superfície Hídrica” e “Baixa Regeneração” por “Fitomassa Aquática”.

Desta forma, a utilização dos índices espectrais NBR e  $\Delta$ NBR, aplicados na mesma paisagem e em momentos distintos, foram de extrema importância para avaliar a intensidade e os danos causados por incêndios em regiões alagadas, permitindo identificar e quantificar tais eventos. A metodologia aplicada torna possível o mapeamento de áreas afetadas pelo fogo, direcionando ações de monitoramento e recuperação, principalmente em regiões de relevante interesse ambiental.

#### V. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, T. I. R.; BERTOLO, R. A.; PARANHOS FILHO, A. C.; ROCHA, M. M.; SÍGOLO, J. B.; SOUZA, G. F. Estudo sobre as diferenças de altimetria do nível da água de lagoas salinas e hipossalinas no Pantanal da Nhecolândia: um indicativo de funcionamento do mega sistema lacustre. *Geociências*, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 401-415, 2009.

BRONZE, G. Área queimada no Pantanal cai 66,8% de 2020 para 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/area-queimada-no-pantanal-cai-668-de-2020-para-2021/>. Acesso em: 18 de fev. 2022.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, v. 37, n. 1, p. 35-46, 1991. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)

ESA. European Space Agency. Sentinel Application Platform (SNAP), 2019. Disponível em: <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>. Acesso em: 23 de dez. 2020.

ESRI. ArcGIS Desktop: versão 10.4. 2016.

FIEDLER, N. C.; MERLO, D. A.; MEDEIROS, M. B. Ocorrência de incêndios florestais no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, Goiás. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 16, n. 2, p. 153-161, 2006. <https://doi.org/10.5902/198050981896>

FONSECA, L. M. G. Processamento digital de imagens. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. 105p.

GATTI, A.; BERTOLINI, A. Sentinel-2: products specification document 2013. Disponível em: <<https://earth.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2+Products+Specification+Document>>. Acesso em: 08/01/2022.

GONÇALVES, W. L. Fogo no Pantanal: uma análise conceitual sobre as contribuições bibliográficas. *Biodiversidade*, Cuiabá, v. 20, n. 1, p. 160-175, 2021.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Banco de Dados de queimadas, 2020. Disponível em: <http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas>. Acesso em: 04 de jan. 2021.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Banco de Dados de queimadas, 2022. Disponível em: [https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas\\_estados/](https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_estados/). Acesso em: 03 de set. 2022.

KEDDY, P.; FRASER, L. H.; SOLOMESHCH, A. I.; JUNK, W. J.; CAMPBELL, D. R.; ARROYO, M. T. K.; ALHO, C. J. R. Wet and wonderful: The world's largest wetlands are conservation priorities. *BioScience*, Oxford, v. 59, n. 1, p. 39-51, 2009. <http://dx.doi.org/10.1525/bio.2009.59.1.8>

KEY, C. H.; BENSON, N. C. The Normalized Burn Ratio (NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity. U.S. Department of the Interior, Northern Rocky Mountain Science Centre, Bozeman, MT, 1999.

KOUTSIAS, N.; KARTERIS, M. Logistic regression modelling of multitemporal Thematic Mapper data for burned area mapping. *International Journal of Remote Sensing*, Wiley, v. 19, n. 18, p. 3499-3514, 1998. <https://doi.org/10.1080/014311698213777>

LASA/UFRJ. Laboratório de Aplicações de Satélites Ambientais da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Área Queimada – Pantanal, 2020. Disponível em: <https://lasa.ufrrj.br/noticias/area-queimada-pantanal-2020/>. Acesso em: 04 de jan. 2021.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P.; ALVES, L. M.; CUADRA, S. V. et al. Future change of climate in South America in the late Twenty-First Century: Intercomparison of scenarios from three regional climate models. *Climate Dynamics*, Springer, v. 35, p. 1073-1097, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-009-0721-6>

MELO, A. C. A.; MARTINS, P. T. A. Avaliação de índices espectrais para identificação de áreas queimadas no Cerrado utilizando dados Sentinel 2. *Anais do XIX Simpósio de Sensoriamento Remoto*, 19, 2019, Santos. INPE, 14-17 de abril, p. 2501-2504.

NASCIMENTO, I. S.; CRUZ, C. B. M.; NEVES, S. M. A. S.; GALVANIN, E. A. S. Avaliação da exatidão dos classificadores Maxver e Iso Cluster do software Arcgis for Desktop, com uso de imagem Landsat 8 do município de Cáceres/MT. *Revista Continentes*, Rio de Janeiro, ano 5, n. 8, p. 48-62, 2016.

NOVO, E. M. L. M. Sistemas aquáticos continentais: definição e características. In: Barbosa, C. C. F.; Novo, E. M. L. M.; Martins, V. S. *Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: princípios e aplicações*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. p. 9-22.

PARANHOS FILHO, A. C.; MOREIRA, E. S.; OLIVEIRA, A. K. M.; PAGOTTO, T. C. S.; MIOTO, C. L. Análise da variação da cobertura do solo no Pantanal de 2003 a 2010 através de sensoriamento remoto. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 19, p. 69-76, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522014019010000305>

PIRAJÁ, V. P.; OLIVEIRA, A. K. M.; MATIAS, R.; REZENDE-FILHO, A. T. Sistemas de geotecnologias para monitoramento de queimadas: viabilidade de utilização de sensores orbitais e geoestacionários para identificar incêndios florestais em área modelo do Pantanal da Nhecolândia, Mato Grosso do Sul. Caderno de Geografia, Belo Horizonte, v. 33, n. 72, p. 30-49, 2023. <http://dx.doi.org/10.5752/p.2318-2962.2023v33n.72.p.30>

Pott, A.; Oliveira, A. K. M.; Damasceno-Júnior, G.; Silva, J. S. Plant diversity of the Pantanal wetland. Brazilian Journal of Biology, São Carlos, v. 71, n. 1, p. p. 265-273, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842011000200005>

REZENDE FILHO, A. T.; FURIAN, S.; VICTORIA, R. L.; MASCRÉ, C.; VALLES, V.; BARBIERO, L. Hydrochemical variability at the Upper Paraguay Basin and Pantanal wetland. Hydrology and Earth System Sciences, Bondy Cedexv, 16, n. 8, p. 2723-2737, 2012.

ROSAN, T. M.; ALCÂNTARA, E. Detecção de áreas queimadas e severidade a partir do índice espectral  $\Delta NBR$ . Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 17, 2015, João Pessoa. INPE, 25 a 29 de abril, p. 526-533.

SILVA, R. S.; PAES, A. T. Teste de concordância Kappa. Educação Continuada em Saúde Einstein, São Paulo, v. 10, n. 4, p. 165-166, 2012.

SIMULA, M. Towards defining forest degradation: Comparing analysis of existing definitions. Forests Resources Assessment Working Paper, n. 154. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009. 59p.

VIGANÓ, H. H. G.; Souza, C. C.; Reis Neto, J. F.; Cristaldo, M. F.; Jesus, L. Prediction and modeling of forest fires in the Pantanal. Revista Brasileira de Meteorologia, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 306-316, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786332012>

USGS. Science For a Changing World. Sentinel-2, 2015. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 23 de dez. 2020.