

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FABIANA SEGALLA KRASNHAK

ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PROVENIENTES
DAS QUEIMADAS NO PARQUE NACIONAL DO PANTANAL MATOGROSSENSE
ENTRE 2020 E 2024

CURITIBA

2024

FABIANA SEGALLA KRASNHAK

ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PROVENIENTES
DAS QUEIMADAS NO PARQUE NACIONAL DO PANTANAL MATOGROSSENSE
ENTRE 2020 E 2024

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós-Graduação em MBA em Gestão Ambiental, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Gestão Ambiental.

Orientador(a): Prof.^a Dr.^a Bruna Nascimento de Vasconcellos

CURITIBA

2024

Estimativa das Emissões de Gases de Efeito Estufa Provenientes das Queimadas no Parque Nacional do Pantanal Matogrossense entre 2020 e 2024

Fabiana Segalla Krasnhak

RESUMO

Em 2020, o Parque Nacional do Pantanal Matogrossense enfrentou queimadas sem precedentes, resultantes da intensificação da seca na região, consequência das mudanças climáticas e da expansão das atividades agropecuárias. No ano de 2024, a Unidade de Conservação voltou a registrar incêndios florestais de grandes proporções. Nesse contexto, sabendo-se que a queima de biomassa libera emissões de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera, o presente trabalho visa estimar o montante de CO₂, CH₄ e N₂O emitidos entre 2020 e 2024 utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Para identificar as áreas mais afetadas, calculou-se o Índice de Área Queimada Normalizada (NBR) a partir de imagens Sentinel-2, que revelou que a região nordeste do Parque foi a mais afetada nesse período. As estimativas das emissões de GEE foram feitas através da quantificação dos hectares queimados, por meio da vetorização de imagens PlanetScope, aplicando-se posteriormente a equação proposta por IPCC (2006). Os resultados indicaram que as queimadas ocorridas até novembro de 2020 liberaram cerca de 845.905 toneladas de CO₂e para a atmosfera, com redução das emissões para os dois anos subsequentes, com aproximadamente 251.459 e 41.602 toneladas de CO₂e, aumentando para 75.188 toneladas de CO₂e em 2023. Para 2024, considerando os incêndios florestais até o mês de julho, obteve-se o valor de 357.155 toneladas de CO₂e. Esse cenário destaca a importância de medidas de mitigação das queimadas e das mudanças climáticas, como o monitoramento ambiental, o incentivo a práticas agropecuárias sustentáveis, a educação ambiental da comunidade e a expansão das brigadas de incêndio.

Palavras-chave: queimadas; sensoriamento remoto; Índice de Área Queimada Normalizada; mudanças climáticas.

ABSTRACT

In 2020, the Pantanal Matogrossense National Park experienced unprecedented wildfires, driven by intensifying droughts in the region due to climate change and the expansion of agricultural activities. In 2024, the Conservation Unit once again recorded large-scale forest fires. In this context, considering that biomass burning releases greenhouse gases (GHGs) into the atmosphere, this study aims to estimate the emissions of CO₂, CH₄, and N₂O between 2020 and 2024 using remote sensing techniques. To identify the most affected areas, the Normalized Burn Ratio (NBR) was calculated using Sentinel-2 images, which revealed that the northeastern region of the Park was the most impacted during this period. GHG emissions were estimated by quantifying the burned hectares through the vectorization of PlanetScope images, followed by applying the equation proposed by the IPCC (2006). The results indicated that by November 2020, the fires had released approximately 845,905 tons of CO₂e into the atmosphere, with a reduction in emissions over the next two years, amounting to approximately 251,459 tons and 41,602 tons of CO₂e, respectively, before increasing again to 75,188 tons in 2023. For 2024, considering fires up to July, an estimated 357,155 tons of CO₂e were released. This scenario highlights the importance of measures to mitigate wildfires and climate change, such as environmental monitoring, promoting sustainable agricultural practices, community environmental education, and the expansion of firefighting brigades.

Keywords: wildfires; remote sensing; Normalized Burn Ratio; climate change.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), as mudanças climáticas têm se intensificado rapidamente nos últimos anos. Esse fenômeno é decorrente do aumento das emissões de gases de efeito estufa, provocadas pelas atividades humanas, que se intensificaram desde a Revolução Industrial. Como consequência, a temperatura média global tem aumentado significativamente, assim como eventos climáticos extremos como secas prolongadas e, conseqüentemente, incêndios florestais (IPCC, 2023).

Os incêndios representam uma das principais ameaças ambientais aos ecossistemas florestais. Frequentemente, eles se originam de queimadas realizadas para a expansão de áreas destinadas às atividades agropecuárias. Contudo, esses incêndios podem atingir maiores proporções e se alastrar por extensas áreas florestais. Essa difusão é facilitada pelas condições do clima da região, como estiagem prolongada, umidade relativa do ar reduzida e baixa pluviosidade, que podem ser consequências das mudanças climáticas na região (FERREIRA FILHO; ARAÚJO, 2021).

Entre os danos ambientais dos incêndios florestais estão as emissões de dióxido de carbono (CO_2) liberado da biomassa que o armazenou por meio da fotossíntese, contribuindo para um ciclo de retroalimentação das mudanças climáticas. De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2018), em anos de seca os incêndios florestais, por si só, contribuem anualmente com aproximadamente um bilhão de toneladas de CO_2 para a atmosfera, o que representa mais da metade das emissões relacionadas ao desmatamento. Aragão et al. (2018) destacam que o governo brasileiro fez progressos nas estimativas de gases de efeito estufa resultantes do desmatamento. No entanto, considerando a crescente magnitude dos incêndios florestais, especialmente em períodos de seca, é crucial que as emissões provenientes desses incêndios passem a ser contabilizadas e relatadas.

Além dos prejuízos ao clima local, as queimadas resultam na perda de biodiversidade, na redução da fertilidade do solo e na poluição do ar. Também, tem-se impactos sociais como deslocamento de comunidades, danos às infraestruturas, prejuízos econômicos, problemas de saúde como doenças respiratórias e perda de vidas (FERREIRA FILHO; ARAÚJO, 2021; DOS SANTOS; DA SILVA; GUSMÃO, 2024).

Em 2020, o bioma brasileiro Pantanal, que se estende pelos estados de Mato Grosso (MT) e Mato Grosso do Sul (MS), enfrentou incêndios de proporções sem precedentes, afetando cerca de 30% de sua área total (SHIMABUKURO *et al.*, 2023) com mais de 22 mil focos de incêndio (INPE, 2024). Esses números são particularmente alarmantes para uma região que é reconhecida como a maior área úmida tropical do planeta (FERREIRA; SILVA, 2023).

Sabe-se que o Pantanal é uma região onde historicamente é aplicada a queima controlada da vegetação nas áreas agrícolas e de pecuária (SORIANO *et al.*, 2020). Contudo, muitas vezes esse manejo é feito de forma inadequada e o fogo acaba causando incêndios descontrolados atingindo terras indígenas e unidades de conservação (UCs) no bioma (FERREIRA FILHO; COSTA, 2021).

O Parque Nacional do Pantanal Matogrossense (PNPM), localizado em Poconé - MT, é uma unidade de conservação (UC) de Proteção Integral (INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL, 2024), ou seja, uma UC que visa a preservação da natureza, com admissão apenas do uso indireto dos recursos naturais, possuindo regras restritivas (BRASIL, 2000). Entretanto, em 2020, teve grande parte da sua área consumida pelo fogo. Isso é preocupante devido ao grande acréscimo de gases de efeito estufa, o que influencia no microclima da região (FERREIRA; SILVA, 2023).

O sensoriamento remoto é uma ferramenta essencial para o monitoramento de incêndios florestais, pois sensores e satélites oferecem dados temporais e espaciais detalhados. Esses dados permitem a criação de imagens precisas das áreas afetadas, facilitando a identificação das regiões queimadas e a avaliação dos impactos ambientais resultantes (FERREIRA; SILVA, 2023). Sua aplicação se torna ainda mais crucial em áreas de preservação, onde a proteção de ecossistemas frágeis e a recuperação de habitats são fundamentais para a manutenção da biodiversidade e da saúde ambiental.

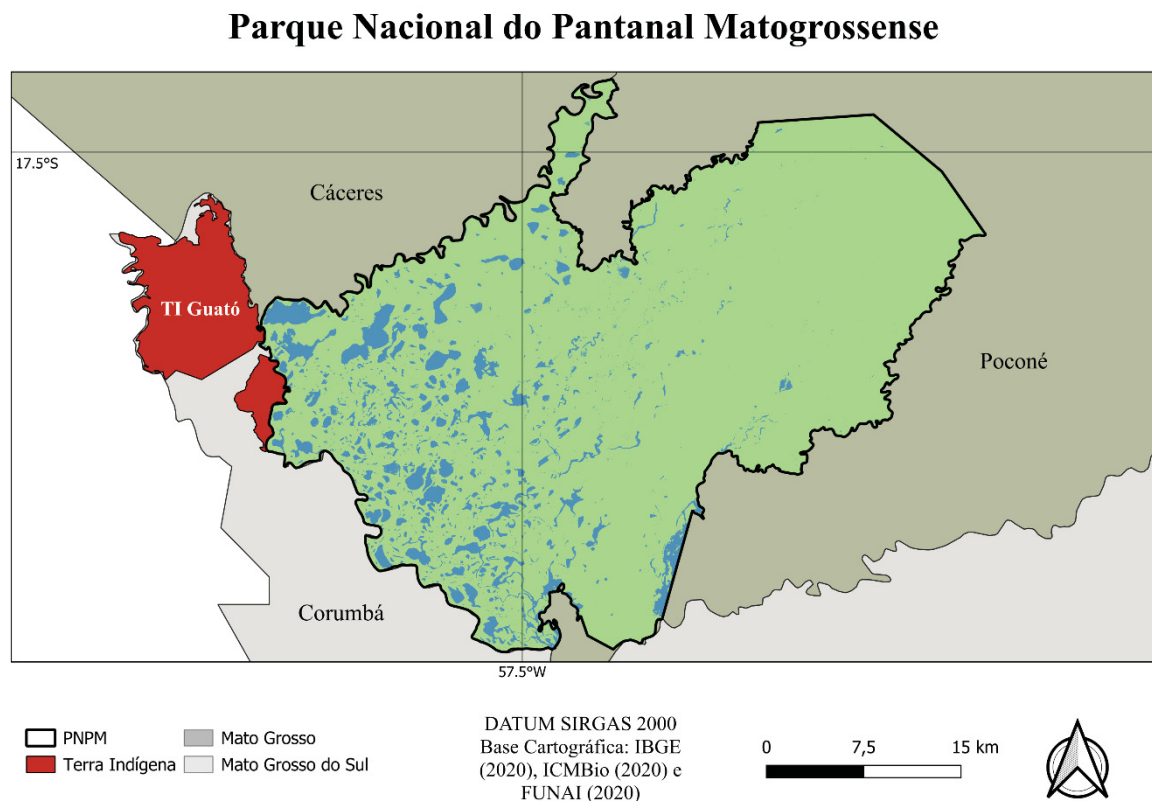
No primeiro semestre de 2024, os focos de queimadas no Pantanal aumentaram em 898% em comparação com o mesmo período de 2020, sendo que o período de estiagem ainda está no início (WWF BRASIL, 2024a). Diante disso, este trabalho tem como objetivo estimar os gases de efeito estufa decorrentes dos incêndios florestais no Parque Nacional do Pantanal Matogrossense, utilizando técnicas de sensoriamento remoto entre 2020 e 2024.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A área de estudo é o Parque Nacional do Pantanal Matogrossense, localizado no bioma Pantanal. Esta Unidade de Conservação abrange os municípios de Poconé e Cáceres, no estado de Mato Grosso, e Corumbá, no estado de Mato Grosso do Sul, conforme a Figura 1. O Parque Nacional do Pantanal Matogrossense contempla aproximadamente 135 mil hectares e é reconhecido como Patrimônio Mundial da UNESCO desde 2000. Criado em 1981 pelo Decreto nº 86.392, de 24 de setembro, o Parque tem como principal objetivo a conservação do ecossistema pantaneiro. Sua gestão é realizada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) (IBAMA, 2003).

FIGURA 1 — Localização do Parque Nacional do Pantanal Matogrossense.



Fonte: O autor (2024).

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Aw (clima tropical, com inverno seco), caracterizado por ser quente e úmido, com estação chuvosa no verão e estiagem no inverno e possui uma temperatura média anual de

24°C. O local apresenta época seca de maio a setembro e época chuvosa de outubro a abril, sendo entre dezembro e fevereiro os meses com maior precipitação. Dessa forma, sua paisagem é dinâmica devido às cheias alimentadas pelas chuvas intermitentes dos rios tributários da Bacia do Alto Paraguai (IBAMA, 2003).

O Parque Nacional do Pantanal está em uma zona de transição entre o Cerrado e a Amazônia e seu território abriga matas, cerradões, savanas, campos inundáveis, brejos e lagoas. Embora não possua muitas espécies endêmicas devido a essa transitoriedade, a região é reconhecida como um sítio de biodiversidade único (IBAMA, 2003). Entre as espécies ameaçadas da fauna protegidas pela UC estão a onça-pintada, o tamanduá-bandeira e a ariranha (ICMBio, 2024).

Nos arredores do Parque Nacional do Pantanal Matogrossense, existem interesses conflitantes, como a pecuária extensiva e a agricultura, que utilizam queimadas para a renovação dos pastos (IBAMA, 2003). Também, tem-se a Terra Indígena Guató que se sobrepõe à área do parque em aproximadamente 39 hectares (INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL, 2024).

2.2 Métodos

Para avaliar a quantidade de focos de incêndio no Parque Nacional do Pantanal, foi utilizado o portal BDQueimadas do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Este portal fornece dados por meio do satélite de referência AQUA M_T, que possui o sensor MODIS com passagem diária, permitindo a composição de séries temporais e espaciais ao longo dos anos. Esses dados coincidem com os focos detectados pela NASA e pela Universidade de Maryland (UMD) (INPE, 2024).

Sabendo-se que, até o momento, o pior evento de queimadas no PNPM ocorreu no ano de 2020, optou-se por realizar uma análise desse fenômeno a partir desse ano até julho de 2024. Para definir o período de análise e o processamento das imagens de satélite, foram obtidos os dados mensais de focos de incêndio em 2020 a partir do BDQueimadas.

Após identificar o mês mais crítico de 2020, foram obtidas imagens do satélite Sentinel-2 a partir da plataforma *Copernicus*. O Sentinel-2 foi escolhido devido à sua alta resolução espacial de 20 metros, permitindo um maior detalhamento da área. Suas diversas bandas espectrais, que cobrem desde o visível até o infravermelho de onda curta, possibilitam a análise da vegetação, do solo e das cicatrizes de

queimadas. Além disso, as imagens são disponibilizadas gratuitamente (COPERNICUS, 2024). As imagens foram selecionadas de forma a minimizar a cobertura de nuvens e fumaça, reduzindo assim a incerteza na quantificação das áreas queimadas.

Para detecção da vegetação queimada, foi aplicado o Índice de Área Queimada Normalizada (NBR), que é utilizado para destacar espectralmente as áreas que passaram por incêndios florestais. Esse índice combina o infravermelho próximo (NIR), correspondente à banda 8, com o infravermelho de ondas médias (SWIR 2), correspondente à banda 12, utilizando a seguinte equação (ARDILA; MUÑOZ; SOPCHAKI, 2023):

$$NBR = \frac{NIR - SWIR\ 2}{NIR + SWIR\ 2} \quad (1)$$

O índice varia de -1 a +1, sendo que valores mais próximos de +1 indicam áreas mais afetadas pelas queimadas, enquanto valores próximos de -1 representam áreas que não foram queimadas. O objetivo foi avaliar as regiões mais impactadas do Parque e a intensidade das queimadas.

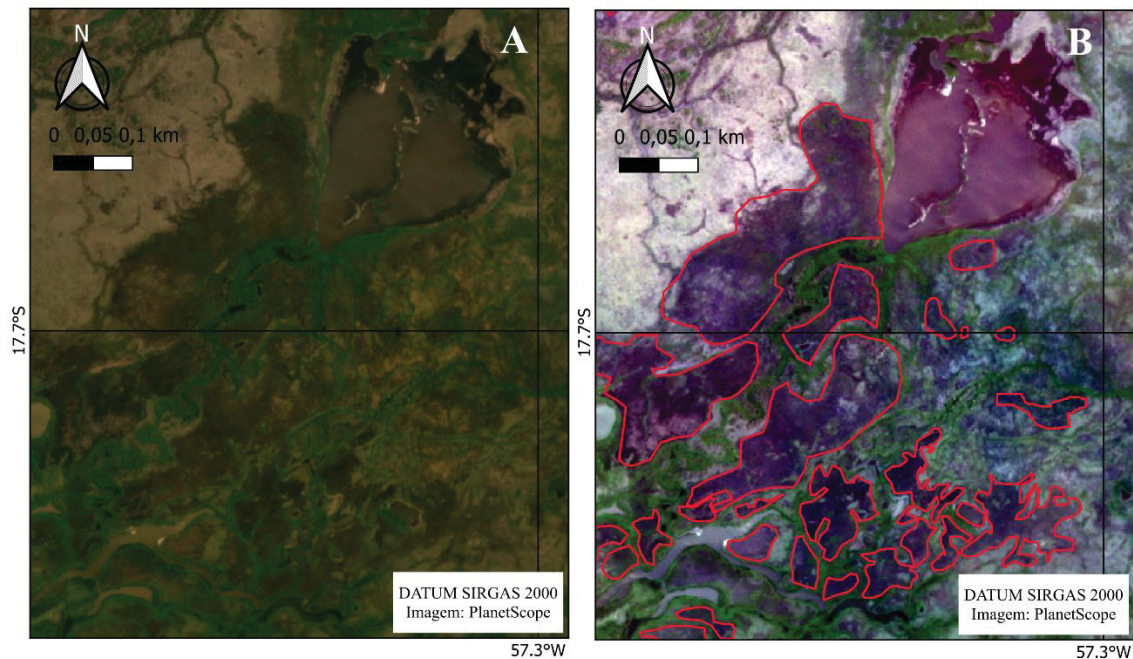
Para a quantificação dos principais gases de efeito estufa (CO_2 , CH_4 e N_2O), foi utilizada a equação proposta em *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 - Agriculture, Forestry and Other Land Use* (IPCC, 2006). A fórmula considera o fator de emissão de gases, que depende do tipo de vegetação queimada (F , em $g.kg^{-1}$), da área queimada (A , em hectares), da densidade de biomassa acima do solo (B , em toneladas.ha $^{-1}$) e do fator de combustão (C), conforme expresso na equação (2) a seguir:

$$M = F * A * B * C * 10^3 \quad (2)$$

A quantificação das áreas queimadas foi realizada através da aquisição e vetorização de imagens do satélite Planet, com 4 bandas espectrais (vermelho, verde, azul e infravermelho próximo), e alta resolução espacial (4,77 metros) obtidas de forma gratuita na plataforma por meio do cadastro no projeto *Norway's International Climate & Forests Initiative* (NCFI, 2024). Durante o processo de vetorização, conforme ilustrado na Figura 2, as áreas queimadas foram identificadas na faixa do

visível, apresentando tonalidades de roxo. Foram considerados diferentes tons arroxeados, variando do mais claro ao mais escuro, para contabilizar tanto as cicatrizes de queimadas recentes quanto as mais antigas, englobando as áreas queimadas próximas do início do ano até o período analisado.

FIGURA 2 — Vetorização de uma área de 10/2021 utilizando imagem do PlanetScope visual (A) e normalizada (B), com composição R(1)G(2)B(3).



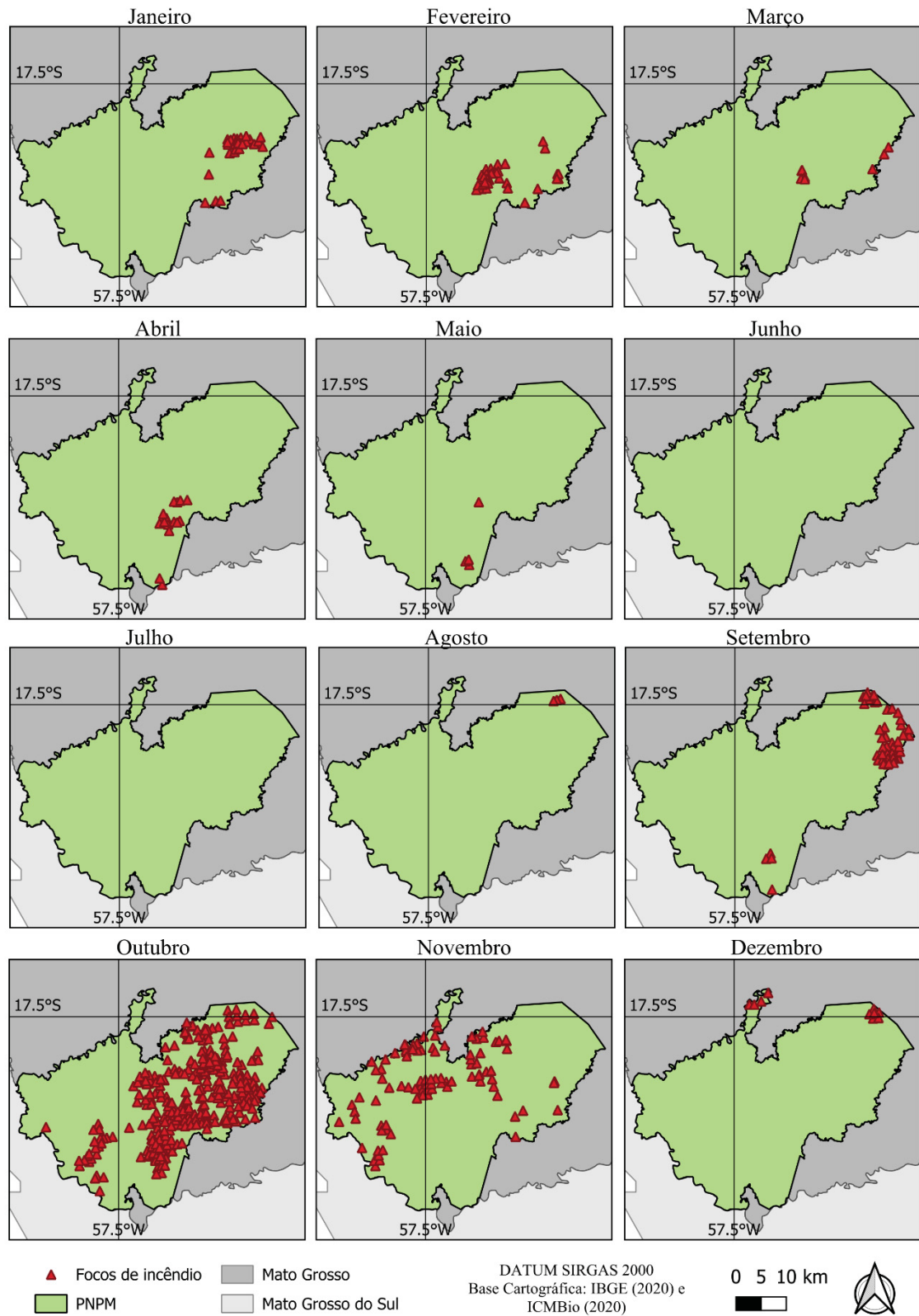
Fonte: O autor (2024).

O tipo de vegetação queimada foi identificado pela interseção do shapefile da cobertura vegetal do Pantanal, fornecido pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2006), com as vetorizações anuais. Os valores de densidade de biomassa acima do solo e fator de combustão foram obtidos do Relatório de Referência: Setor Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas do Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (BRASIL, 2015). Já os fatores de emissão foram extraídos de IPCC (2006).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos dados de focos de incêndio de 2020, adquiridos do BDQueimadas, foi elaborado o mapa mostrado na Figura 3, que exhibe a localização dos pontos de queimadas. Observa-se que, naquele ano, o mês de outubro registrou a maior concentração de incêndios.

FIGURA 3 — Focos de incêndios florestais no Parque Nacional do Pantanal Matogrossense ao longo dos meses de 2020.

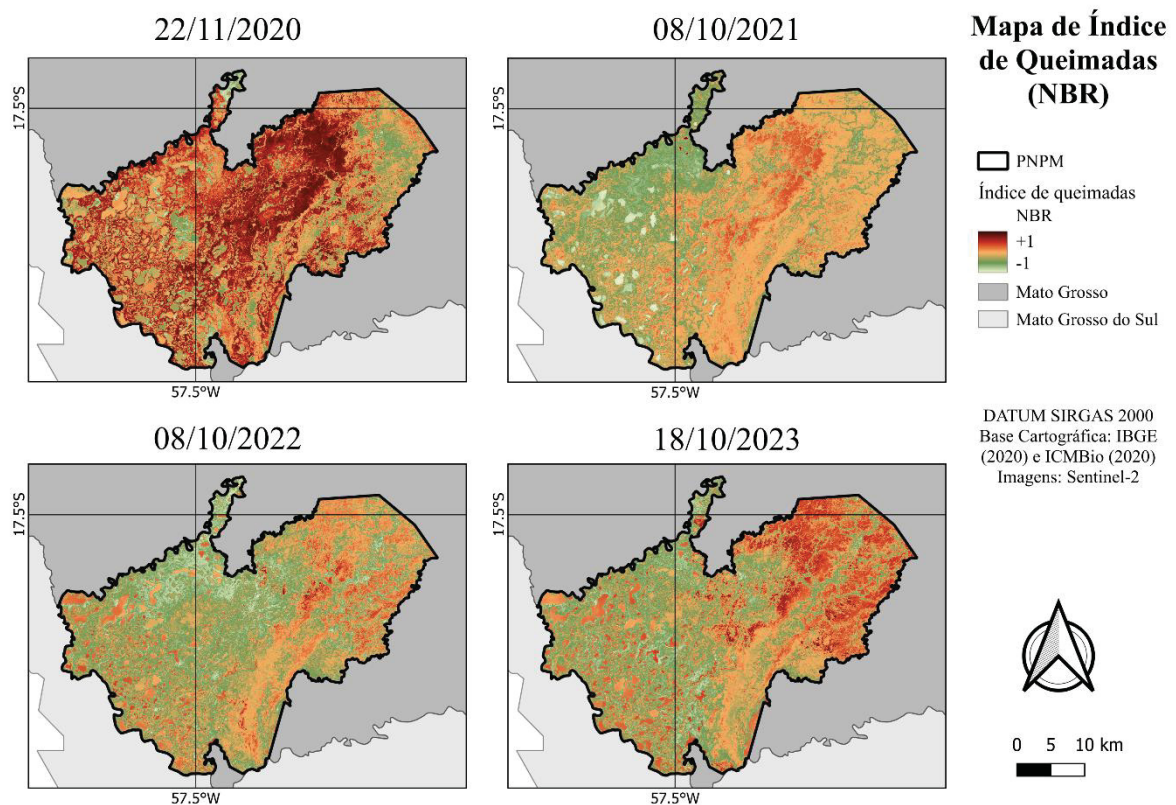


Fonte: O autor (2024).

Devido ao elevado número de incêndios florestais em outubro de 2020, foram priorizadas imagens do satélite Sentinel-2 deste mês para análise nos anos seguintes. Entretanto, para o ano de 2020, devido à presença de nuvens e fumaça, decorrente das queimadas, foi necessário utilizar a imagem do mês subsequente para não comprometer a qualidade das análises. As imagens escolhidas para a análise são datadas de 22/11/2020, 08/10/2021, 08/10/2022 e 18/10/2023. Para o ano de 2024, visando uma análise preliminar, utilizou-se a imagem de 24/07.

Através do cálculo do índice NBR para as datas selecionadas, observou-se que, no período analisado, o ano de 2020 apresentou a maior quantidade de cicatrizes de incêndios florestais, afetando praticamente toda a área do Parque Nacional do Pantanal Matogrossense, com uma concentração mais significativa de cicatrizes na região centro-nordeste da Unidade de Conservação, conforme a Figura 4. Para os dois anos subsequentes, a área afetada diminuiu e a severidade de queimadas voltou a aumentar para o ano de 2023, com maior concentração no nordeste.

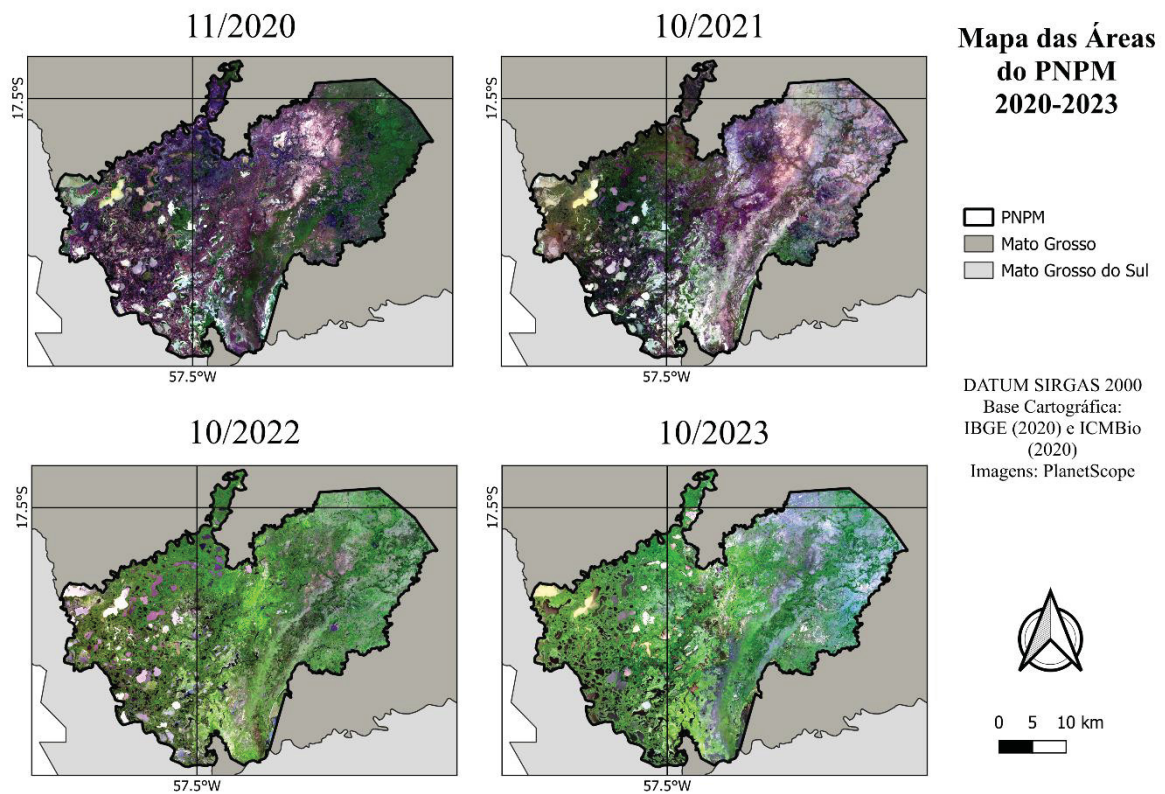
FIGURA 4 — Índices de Área Queimada Normalizada (NBR) no Parque Nacional do Pantanal Matogrossense para os anos 2020-2024.



Fonte: O autor (2024).

Analisando os mosaicos mensais Planet mostrados na Figura 5, pode-se notar que o índice NBR representou de forma satisfatória as regiões mais afetadas por queimadas, sendo essas caracterizadas pela coloração arroxeada. Observou-se, contudo, a ocorrência de confusão na distinção entre áreas queimadas e áreas úmidas, um problema relatado em estudos anteriores (ROSAN; ALCÂNTARA, 2014; PIRAJÁ *et al.*, 2022). Embora esse tipo de imprecisão possa ser corrigido por meio de técnicas específicas, no presente estudo optou-se por não aplicar correções, uma vez que o cálculo do NBR tinha como finalidade exclusiva a comparação visual.

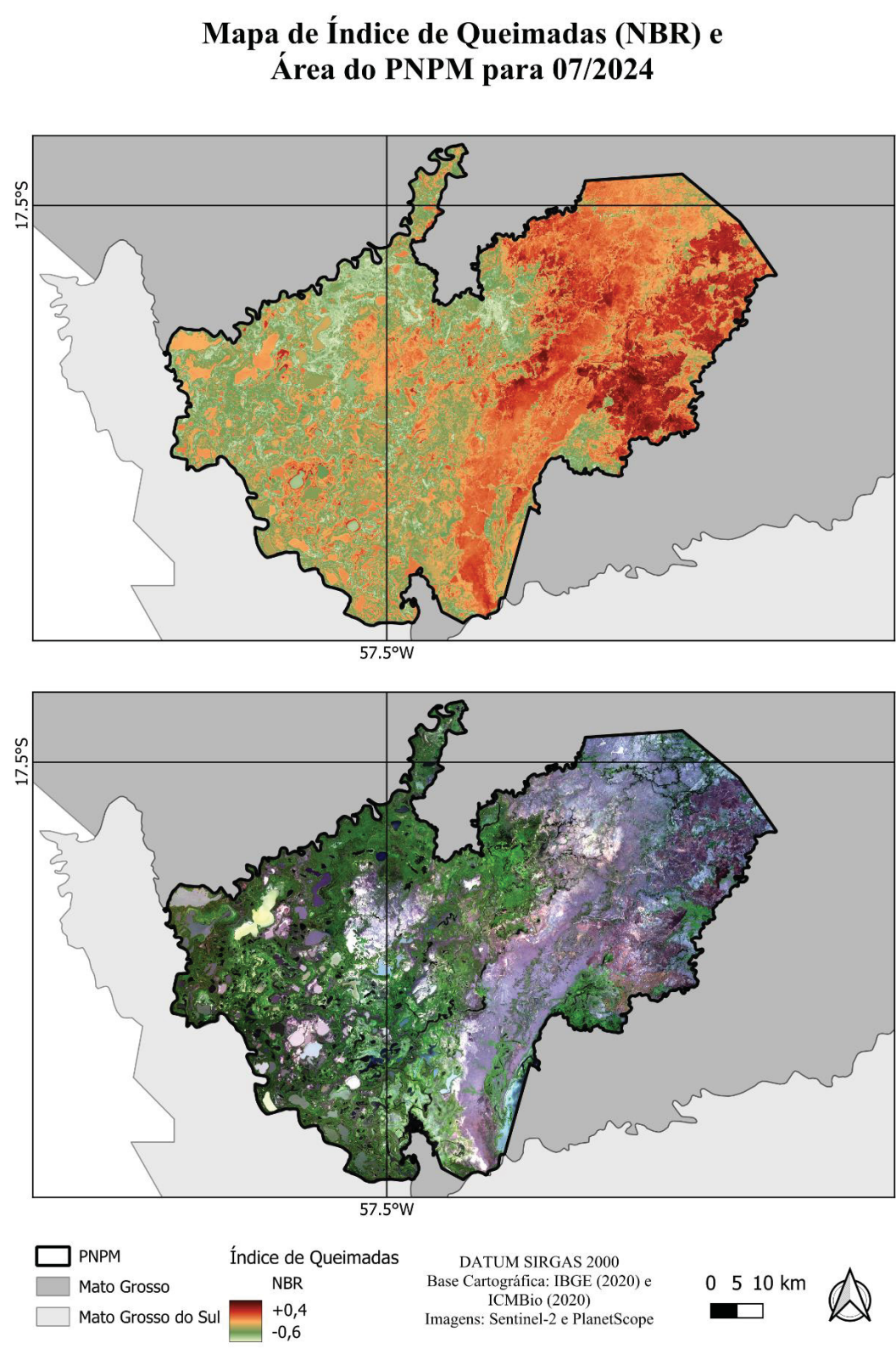
FIGURA 5 — Imagens do Parque Nacional do Pantanal Matogrossense para os anos 2020-2023, em R(1)G(2)B(3).



Fonte: O autor (2024).

As análises referentes ao período de janeiro a julho de 2024 indicam um aumento expressivo das áreas queimadas em comparação aos três anos anteriores, com maior concentração novamente na região nordeste, conforme Figura 6.

FIGURA 6 — Índice de Área Queimada Normalizada (NBR) e imagem R(1)G(2)B(3) do Parque Nacional do Pantanal Matogrossense para 07/2024.



Fonte: O autor (2024).

As fitofisionomias obtidas nas áreas queimadas foram classificadas em cinco diferentes tipos: Formações Pioneiras (Pa), Savana sem Floresta de Galeria (Sgs), Floresta Estacional Decidual do tipo Submontana (Cs), Ecótono de Floresta Estacional Semidecidual (F) e Formações Pioneiras (Pa), denominado NPt (F+Pa), além de Ecótono entre Savana (S) e Formações Pioneiras, nomeado SPt (S+Pa). O Quadro 1 apresenta os valores empregados nos cálculos das emissões de gases de efeito estufa, abrangendo a densidade de biomassa acima do solo e o fator de combustão para cada tipo de vegetação analisada. Adicionalmente, são apresentados os fatores de emissão para matéria seca, obtidos de IPCC (2006), aplicados às áreas de savana e campos nativos para obtenção das contribuições de CO₂, CH₄ e N₂O.

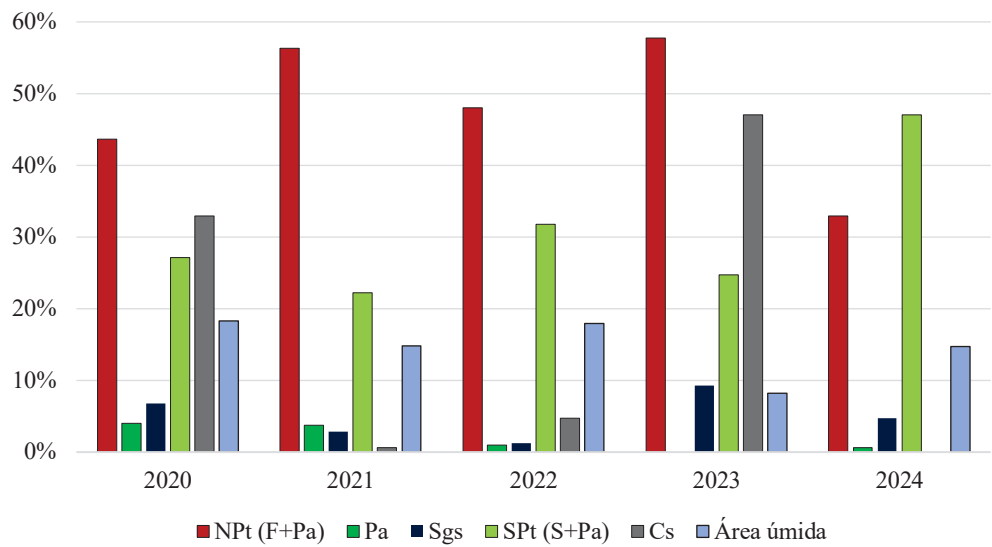
QUADRO 1 — Classes de vegetação, densidades de biomassa disponíveis, fatores de combustão e de emissão para o PNPM.

Classe	Densidade de biomassa acima do solo (t.ha ⁻¹)	Fator de combustão (%)
NPt (F+Pa)	72,11	23,94
Pa	59,82	18,30
Sgs	4,17	92,00
SPt (S+Pa)	11,00	84,00
Cs	84,38	46,40
Gases	Savanas e campos nativos (g.kg ⁻¹ de matéria seca)	
CO ₂	1.613	
CH ₄	2,30	
N ₂ O	0,21	

Fonte: e IPCC (2006), MMA (2006) e BRASIL (2015).

Ao longo dos anos, a proporção de tipos de vegetação afetados pelos incêndios na Unidade de Conservação apresentou variações, conforme ilustrado na Figura 7. A classe mais impactada entre 2020 e 2023 foi a NPt (F+Pa), enquanto, em 2024, a vegetação predominante nas áreas queimadas foi a SPt (S+Pa). Além disso, foram identificadas regiões classificadas como áreas úmidas (cursos d'água). Em épocas de seca intensa, a queda no nível da água pode deixar a vegetação exposta, aumentando sua suscetibilidade a incêndios, especialmente quando já se encontra seca.

FIGURA 7 — Proporção de classes de vegetação queimadas por ano no PNPM.



Fonte: O autor (2024).

O Quadro 2 apresenta os resultados referentes à área queimada obtida através das vetorizações e às emissões de CO₂, CH₄ e N₂O calculadas nos períodos analisados.

QUADRO 2 — Resultados da quantificação de área queimada e emissões de gases de efeito estufa no PNPM para o período 2020-2024. *Desconsidera áreas úmidas.
**Cálculos considerando o GWP (*Global Warming Potential*) do Sexto Relatório de IPCC (2021).

Período analisado	Área queimada (ha) vetorizada	Área queimada (ha) considerada*	CO ₂ (Gg)	CH ₄ (Gg)	N ₂ O (Gg)	CO ₂ e (t)**
nov/2020	45.274,88	36.979,58	787,59	1,12	0,103	845.904,56
out/2021	11.764,34	10.026,72	234,12	0,33	0,030	251.458,92
out/2022	2.108,90	1.730,12	38,73	0,06	0,005	41.601,79
out/2023	3.442,30	3.158,40	70,01	0,10	0,009	75.188,41
jul/2024	20.055,17	17.105,88	332,53	0,47	0,043	357.155,31

Fonte: O autor (2024).

Para validar os valores das áreas afetadas por incêndios florestais, foi realizada uma comparação com os dados do MapBiomas Brasil para o Parque Nacional do Pantanal Matogrossense para os mesmos períodos analisados, que reportou áreas queimadas de 55.154 ha (2020), 10.351 ha (2021), 2.434 ha (2022) e 2.822 ha (2023). As diferenças observadas foram de -17,9%, +13,7%, -13,4% e +22,0%, respectivamente. As discrepâncias observadas são consideradas aceitáveis, uma vez que as análises utilizaram imagens de satélites distintos, sendo Landsat (resolução

de 30 m) e PlanetScope (resolução inferior a 5 m). Além disso, foram empregadas diferentes metodologias: a inteligência artificial utilizada pelo MapBiomas e a vetorização de áreas queimadas no presente estudo. Adicionalmente, é importante destacar que ambas as quantificações consideram queimadas em áreas úmidas. No entanto, para os cálculos de emissões de GEE, essas áreas foram desconsideradas devido à alta sazonalidade a que estão sujeitas, a fim de reduzir a confusão nas análises e proporcionar resultados mais consistentes.

Os resultados indicam que o Parque Nacional do Pantanal Matogrossense enfrentou intensas queimadas em 2020, afetando uma área de 36.979,58 ha até novembro, o que corresponde a aproximadamente 27% do território da Unidade de Conservação. Até julho de 2024, a proporção registrada foi de cerca de 13%. Esse dado é alarmante, pois historicamente as queimadas são mais intensas entre setembro e dezembro (MAPBIOMAS, 2024). Ademais, observa-se que essa área queimada supera as registradas nos três anos anteriores, considerando as áreas atingidas até outubro.

No que se refere às emissões de gases de efeito estufa, os incêndios florestais ocorridos no período de 2020 resultaram em cerca de 787,59 Gg de CO₂, 1,12 Gg de CH₄ e 0,103 Gg de N₂O, totalizando 845.904,65 toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e). Para o ano de 2024, as estimativas até julho apontam emissões de 357.155,31 tCO₂e. Esses números são preocupantes, pois superam os valores registrados nos três anos anteriores até o mês de outubro. Além disso, referem-se a uma Unidade de Conservação de Proteção Integral, onde se espera um controle eficaz das queimadas.

Segundo especialistas do WWF Brasil, o primeiro semestre de 2024 registrou o maior número de focos de incêndio desde o início da série histórica monitorada pelo INPE, em 1998. Esse aumento está associado à severa estiagem que afeta o bioma, impedindo o transbordamento dos cursos d'água, uma situação diretamente relacionada à crise climática global e à influência do fenômeno El Niño. Além das condições climáticas, a intervenção humana também tem um papel importante, seja por atear fogo na vegetação ou desmatar as nascentes dos rios que abastecem a Planície do Pantanal. Em 2020, estimativas dos Ministérios Públicos de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul indicaram que aproximadamente 60% dos focos de incêndio foram causados por atividades agropastoris (WWF BRASIL, 2024b; WWF BRASIL, 2024c).

O aumento das emissões de gases de efeito estufa decorrente das queimadas no Parque intensifica a absorção de radiação infravermelha pela atmosfera. Esse desequilíbrio energético, caracterizado pelo aumento da temperatura no sistema climático, está relacionado às mudanças climáticas globais, conforme apontado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. As consequências desse fenômeno incluem a intensificação de eventos climáticos extremos, como alterações nos padrões de precipitação, ondas de calor mais frequentes e prolongadas, e aumento da intensidade de secas (IPCC, 2023).

Embora o bioma Pantanal seja adaptado ao fogo e naturalmente experimente ciclos alternados de inundação e secas, possuindo uma capacidade de regeneração considerável, há um risco crescente de que isso seja prejudicado pela redução do volume de chuvas na região, causando um desbalanceamento entre emissões e remoções de CO₂ na atmosfera. Desde 2019, o Pantanal tem enfrentado o período mais seco das últimas quatro décadas e a diminuição das precipitações pode resultar no acúmulo de vegetação em áreas que deveriam estar inundadas, aumentando a vulnerabilidade a incêndios de grandes proporções (WWF BRASIL, 2021; WWF BRASIL, 2024b).

4 CONCLUSÃO

Considera-se que dada a severidade dos incêndios florestais que têm ocorrido no Parque Nacional do Pantanal Matogrossense, é essencial que a área seja constantemente monitorada, a fim de impedir os danos decorrentes da propagação descontrolada de fogo, bem como grandes montantes de emissões de gases de efeito estufa e impactos negativos à biodiversidade local. Logo, destaca-se a importância do presente estudo, que empregou técnicas de sensoriamento remoto que se mostraram eficazes tanto para o mapeamento das áreas queimadas quanto para a quantificação das emissões de gases de efeito estufa, com ampla aplicação.

A Unidade de Conservação tem enfrentado secas severas, decorrentes especialmente das mudanças climáticas, o que tem reduzido suas áreas inundáveis. Essa diminuição somada à ação humana de ateamento de fogo na vegetação, tem elevado a intensificação de queimadas em seu território, assim como em todo o bioma Pantanal. Como o processo de queima de biomassa contribui para as emissões de gases de efeito estufa, tem-se um ciclo que tem sido continuamente retroalimentado.

Nesse contexto, é imprescindível que sejam implementadas ações de mitigação das queimadas e das mudanças climáticas, tais como o fortalecimento da fiscalização e o monitoramento ambiental. O uso de imagens de satélite permite que esse monitoramento seja realizado de forma rápida, acurada e com baixo custo. Além disso, é essencial investir na formação e ampliação de brigadas de incêndio, assim como no desenvolvimento de políticas públicas que coíbam práticas ilegais de incêndio. A promoção de práticas agropecuárias sustentáveis e a educação ambiental da população também são fundamentais para prevenir e mitigar os impactos das queimadas.

REFERÊNCIAS

ARAGÃO, L. E. O. C. et al. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions, **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 536, 2018. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02771-y>. Acesso em: 20 jul. 2024.

ARDILA, M. A P.; MUÑOZ, S. I.; SOPCHAKI, C. 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, n. 3, 2023. Disponível em: <https://rbsr.com.br/index.php/RBSR/article/view/129>. Acesso em 20 jul. 2024.

BRASIL. Lei Federal Nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Publicada no Diário Oficial da União**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm. Acesso em: 28 jul. 2024.

BRASIL. Relatório de Referência: Setor Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas do Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2015.

COPERNICUS. Data Space Ecosystem. Disponível em: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>. Acesso em: 29 jul. 2024.

COPERNICUS. Sentinel-2 data collections. Disponível em: <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-2>. Acesso em: 29 jul. 2024.

FERREIRA FILHO, J.; ARAÚJO, A. C. Análise de ocorrências de incêndios florestais na área do Parque Estadual do Cocó, região metropolitana de Fortaleza, CE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 1, p. 563-569, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/43gxJSZsT3wCdCpfZzBThJS/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 24 jul. 2024.

FERREIRA, M. C.; SILVA, C. Análise espaço-temporal das áreas de ocorrência de fogo no Parque Nacional do Pantanal Mato-Grossense entre 1990 e 2020 e suas relações com as zonas de manejo. **Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia**, v. 21, n. 3, p. 268-288, 2023. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/estgeo/article/view/18002>. Acesso em: 19 jul. 2024.

IBAMA. Plano de Manejo do Parque Nacional do Pantanal Matogrossense, Brasília, 2003.

ICMBio. Parna do Pantanal Matogrossense. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/pantanal>. Acesso em: 29 jul 2024.

INPE. BDQueimadas. Disponível em: <http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas>. Acesso em: 20 jun. 2024.

INPE. Incêndios florestais dominam as emissões de carbono durante secas na Amazônia. 2018. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/noticias-obt-inpe/incendios-florestais-dominam-as-emissoes-de-carbono-durante-secas-na-amazonia>. Acesso em: 27 jul. 2024.

INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL. PARNA do Pantanal Mato-Grossense. Unidades de Conservação no Brasil. Disponível em: <https://uc.socioambiental.org/pt-br/arp/600>. Acesso em: 28 jul. 2024.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Chapter 7: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-7/#7.6>. Acesso em: 28 set. 2024.

IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 - Agriculture, Forestry and Other Land Use. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.00.

MAPBIOMAS. Fogo - MapBiomas Brasil. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/fogo>. Acesso em: 28 set. 2024.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. Mapas de cobertura vegetal - PROBIO. 2006. Disponível em: <http://mapas.mma.gov.br/mapas/aplic/probio/datadownload.htm>. Acesso em: 24 set. 2024.

PIRAJÁ, R. V. et al. O uso do índice espectral Delta Δ NBR utilizando dados Sentinel 2 para identificar e delimitar áreas queimadas, utilizando como modelo uma área do Pantanal de Nhecolândia, Mato Grosso do Sul. **RA'EGA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 56, 2022. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/85434>. Acesso em: 28 set. 2024.

PLANET. NICFI Satellite Data Program. Disponível em: <https://www.planet.com/nicfi/>. Acesso em: 19 ago. 2024.

ROSAN, T. M.; ALCÂNTARA, E. Detecção de áreas queimadas e severidade a partir do índice espectral Δ NBR. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 17, 2015, João Pessoa. pp. 526-533. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0104.pdf>. Acesso em 28 jul. 2024.

SANTOS, R. B.; DA SILVA, D. P.; SOUZA, C. G. ANÁLISE MULTITEMPORAL DOS FOCOS DE QUEIMADAS NA MICRORREGIÃO DE ITAPETINGA-BAHIA. **Geoconexões**, v. 1, n. 18, p. 228-247, 2024. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/geoconexoes/article/view/15014/4087>. Acesso em 28 jul. 2024.

SHIMABUKURO, Y. E. et al. Assessment of Burned Areas during the Pantanal Fire Crisis in 2020 Using Sentinel-2 Images. **Fire**, v. 6, n. 7, p. 277, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-6255/6/7/277>. Acesso em: 19 jul. 2024.

SORIANO, B. M. A. et al. Uso do fogo para o manejo da vegetação no Pantanal. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2020. 18 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1123857/uso-do-fogo-para-o-manejo-da-vegetacao-no-pantanal>. Acesso em: 28 jul. 2024.

WWF BRASIL. **Em alerta, Pantanal já acumula o maior número de queimadas desde 2020.** 2024a. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?88741/Em-alerta-Pantanal-ja-acumula-o-maior-numero-queimadas-desde-2020>. Acesso em: 27 jul. 2024.

WWF BRASIL. **Entenda as verdadeiras causas das queimadas no Pantanal.** 2024b. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?89620/Entenda-as-verdadeiras-causas-das-queimadas-no-Pantanal>. Acesso em: 28 set. 2024.

WWF BRASIL. **Pantanal e Cerrado têm primeiro semestre com mais queimadas desde 1998.** 2024c. Disponível em: https://www.wwf.org.br/nossosconteudos/notas_e_releases/?88984/Pantanal-e-Cerrado-tem-primeiro-semester-com-mais-queimadas-desde-1998. Acesso em: 28 set. 2024.

WWF BRASIL. **Seca frequentes ameaçam a capacidade de recuperação do Pantanal.** 2021. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?79828/Secas-frequentes-ameacam-a-capacidade-de-recuperacao-do-Pantanal>. Acesso em: 28 set. 2024.