QUEIMADAS NO CERRADO: AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

Cláudia Arantes Silva [1], Fabiano Morelli [1], Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão [1] e Marcos Adami [1]

[1]Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Caixa Postal 515, 12227-010, São José dos Campos, SP,
claudia.arantes@inpe.br, fabiano.morelli@inpe.br, luiz.aragao@inpe.br, marcos.adami@inpe.br

RESUMO

Queimadas no Cerrado Brasileiro são uma preocupante fonte de emissão de gases do efeito estufa. Este trabalho apresenta uma metodologia de estimativa de emissões baseada em correlações obtidas de experimentos de queimadas prescritas apoiadas por processamento de imagens que fornecem a área queimada nas principais fitofisionomias do Cerrado. Verificou-se que a área de Savana teve maior contribuição, superior a 50%, nas emissões de gases do efeito estufa. As emissões calculadas de dióxido de carbono equivalente foram, aproximadamente, 70 e 120 milhões de toneladas para, respectivamente, os anos de 2018 e 2019. Dada a elevada quantidade emitida, material particulado é um poluente importante das queimadas no Cerrado. As emissões de CO_2 das queimadas no Cerrado equivalem às de grandes setores industriais, ressaltando a urgência de políticas eficazes para a gestão do fogo e a conservação ambiental.

Palavras-chave — *Emissões de Gases de Efeito Estufa, Queimadas no Cerrado, Sensoriamento Remoto, Biomassa, Monitoramento Ambiental.*

ABSTRACT

Fires in the Brazilian Cerrado are a concerning source of greenhouse gas emissions. This work presents a methodology for estimating emissions based on correlations obtained from prescribed fire experiments supported by image processing that provides the burned area in the main phytophysiognomies of the Cerrado. It was found that the Savanna area had the greatest contribution, exceeding 50%, to greenhouse gas emissions. The calculated emissions of carbon dioxide equivalent were approximately 70 and 120 million tons for the years 2018 and 2019, respectively. Given the high amount emitted, particulate matter is an important pollutant from fires in the Cerrado. CO_2 emissions from Cerrado fires are equivalent to those of major industrial sectors, highlighting the urgency of effective policies for fire management and environmental conservation.

Key words — *Greenhouse Gas Emissions, Cerrado Fires, Remote Sensing, Biomass, Environmental Monitoring.*

1. INTRODUÇÃO

O Cerrado, considerado a "savana brasileira", é o segundo maior bioma brasileiro, depois do amazônico. Este abriga nascentes importantes das três maiores bacias hidrográficas da América do Sul: Amazonas, Paraguai e São Francisco.

Este bioma apresenta uma vegetação diversificada, que varia desde campos abertos e savanas até matas mais densas, com árvores de galhos retorcidos, casca espessa e raízes profundas, adaptadas a longos períodos de seca e ao fogo natural. Além de possuir um clima tropical sazonal, com verões chuvosos e invernos secos, o Cerrado abriga uma das maiores biodiversidades do planeta, com milhares de espécies de plantas, e centenas de espécies de mamíferos, aves, peixes e répteis, muitas delas endêmicas [1].

Outra caracterítica particular do Cerrado é sua resiliência ao fogo, desenvolvida ao longo de milhões de anos. Já os ecossistemas dominados por florestas tropicais úmidas, são sensíveis ao fogo [1].

O Cerrado passou por processos de adaptação para suportar queimadas naturais que, historicamente, ocorrem durante a estação seca devido a raios e, mais recentemente, por ação humana. Povos indígenas e tradicionais utilizam o fogo em atividades de caça e na agricultura com o objetivo de melhorar o controle de pragas [2]. Os ecossistemas do Cerrado evoluíram sob a influência do pastejo e do fogo, sendo essenciais para controlar o domínio da vegetação lenhosa [3].

O Cerrado é um hotspot de biodiversidade que está passando por mudanças significativas no uso da terra, com apenas 3,2% de sua área terrestre sob proteção [4]. Algumas áreas de proteção ambiental do Cerrado estão ocupadas por quilombolas e famílias tradicionais e, historicamente, estiveram em conflito com a política de zero-fogo do governo federal [5].

Depois do lançamento do programa de Manejo Integrado do Fogo (MIF), em Áreas Protegidas (PAs), houve redução de 40% a 57% nos incêndios no final da estação seca [6].

Mais recentement, julho de 2024, o Congresso Nacional decretou e sancionou a Lei 14.944 que institui a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo [7] que estabelece diretrizes para o uso do fogo em áreas rurais, com foco na sustentabilidade e na proteção da biodiversidade.

Questões ecológicas fundamentais sobre o manejo do fogo no Cerrado, como o impacto da supressão do fogo na biodiversidade, as respostas de como espécies vegetais e

animais reagem ao fogo, a frequência ideal de queima, a temporada adequada para queimadas controladas, o tamanho ideal das áreas queimadas, a relação entre a diversidade de queima e a biodiversidade, e como o fogo afeta os componentes abióticos do ecossistema, ainda necessitam ser respondidas [5].

Queimadas, sejam elas controladas ou não, são uma fonte significativa de gases do efeito estufa e outros poluentes, como dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono, material particulado, entre outros.

Para o Cerrado, estimativas de emissões provenientes de área queimadas estão relacionadas ao tipo e densidade da vegetação. Spawn et al. [10] produziram mapas de densidade de carbono de biomassa obtidos remotamente para o ano de 2010. Para estimar a biomassa acima do solo (AGB – Above Ground Biomass) em florestas tropicais, Avitabile et al. [11] aplicaram um método de fusão de mapas de sensoriamento remoto derivados de Saatchi et al. [12] e de Baccini et al. [13].

Um importante estudo relativo aos efeitos e comportamento de incêndios experimentais em campos, savanas e florestas do Cerrado Brasileiro pode ser visto em [14]. Os autores apresentam um conjunto de correlações úteis na estimativa de emissões de carbono com origem na queimada de diferentes tipos de vegetação que caracterizam o Cerrado brasileiro[14].

Com o intuito de aprimorar a capacidade do Brasil em mapear e monitorar áreas queimadas, compreendendo melhor a dinâmica do fogo e seus impactos, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) instituiu o Programa de Monitoramento dos Biomas Brasileiros. Este programa visa utilizar metodologias mais modernas e novas tecnologias para melhorar o entendimento da dinâmica do fogo e seus impactos ambientais e socioeconômicos das queimadas. A interoperabilidade das tecnologias de observação da Terra é crucial para os sistemas nacionais de monitoramento ambiental, sendo essencial para o Brasil devido à vastidão de seu território.

O Programa de Queimadas do INPE tem sido fundamental no monitoramento de queimadas/incêndios na América do Sul desde 1998. Em 2015 apresentou avanços significativos com o Programa Queimadas **[8]** gerando informações mais precisas e atualizadas sobre os incêndios e áreas queimadas. As estimativas de emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes de área queimadas estão relacionadas ao tipo e densidade da vegetação. A partir de correlações matemátias, é possível estimar, com boa precisão, as emissões a partir de dados satelitais. O objetivo deste trabalho é apresentar as emissões de GEE a partir de cicatrizes de áreas queimadas para o bioma Cerrado nos anos de 2018 e 2019.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O Cerrado representa quase um quarto da área terrestre do país e está presente em 13 estados: Bahia, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Piauí, Rondônia, São Paulo, Tocantins e Distrito Federal.

As fitofisionomias do Cerrado, conforme IBGE [9], foram selecionados a partir de atributos definidos por tipo de vegetação, conforme pode se visto na Fig. 1. Basicamente tem-se vegetação campestre, savânica e floresta.

Neste trabalho, as estruturas vegetais foram divididas em três grandes classes: FF, FC e FS referentes a florestas (cerradão), campos limpos (gramíneas) e savana (árvores esparsas), respectivamente, conforme ilustrado na Fig. 1. É de se esperar que estas fitofisionomias tenham comportamento diferenciado em ocorrências de fogo.

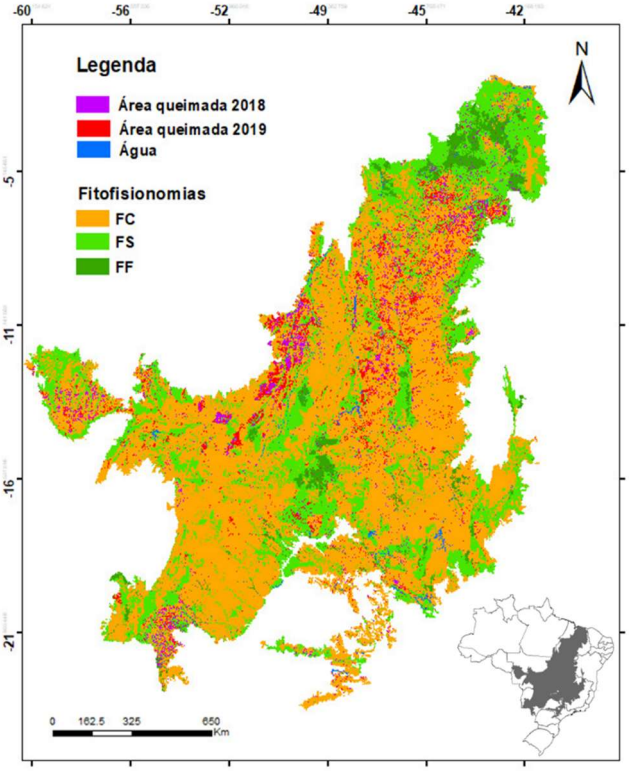


Figura 1. Mapa de Fitofisionomias do Cerrado (adaptado, IBGE) e áreas queimadas (Programa Queimadas, INPE).

Gomes et al. [14] compilaram dados de 65 experimentos de queimadas prescritas no Cerrado brasileiro para avaliar como o comportamento do fogo e as emissões relacionadas ao fogo variam entre diferentes tipos de vegetação. O estudo focou nos ecossistemas de campos (FC), savanas (FS) e florestas (FF) dentro do bioma de interesse. Os resultados mostram que a carga de combustível é uma métrica essencial para o comportamento do fogo e as emissões associadas em todos os tipos de vegetação do Cerrado.

A carga de material combustível (kg m^{-2}) refere-se a todo o material vivo ou morto acumulado na superfície do solo, incluindo gramíneas, folhas e pequenos gravetos [14].

Ward et al. [15] relatam carga de combustível variando de 0,71 a 1,0 kg/m^2 no espectro de campo limpo até cerrado stricto sensu. Com base na Fig. 1, pode-se concluir que a formação campestre (FC) é a predominante no Cerrado brasileiro, seguido de savanas, com modestas estruturas do

tipo floresta. É de se esperar, portanto, que as emissões de GEE, a partir de incêndio no Cerrado brasileiro, tenha a maior percela com origem na queima de gramíneas típicas dos campos limpos e na vegetação de savana. Segundo Gomes et al. [14], parâmetros como taxa de propagação do fogo, intensidade do fogo, calor liberado, consumo de material fino, eficiência de combustão e emissões de carbono, são bastante similares na queima de campos limpos e savanas. Por exemplo, o consumo de material fino relatado foi da ordem de 0,59 e 0,58 kg m^{-2} para FC e FS, respectivamente, e da ordem de 0,15 para FF (floresta). Já a eficiência de combustão foi de 87% e 86% para FC e FS, respectivamente, e da ordem de 39% para FF (floresta). Sendo a área de floresta uma pequena fração da área do Cerrado, sua contribuição para a emissão de gases do efeito estufa é baixa frente aos outras duas fitofisionomias. De fato, Gomes et al. [14] estimaram o fator de emissão de GEE (kg m^{-2}) de 0,23 e 0,21 para FC e FS, respectivamente, e da ordem de 0,05 kg m^{-2} para FF (floresta).

As equações para as estimativas de emissão de CO_2 (kg), metano, e material particulado, em base mássica, são encontradas em Ward et al. [**15**] na forma

$$Q_n = A_f F_f \beta_f . E_n \quad (1)$$

Na Eq. (1), A_f é a área queimada para uma dada fitofisionomia f, F_f é a carga de combustível (kg/m^2) acima do solo, β_f é a eficiência de combustão para uma dada fitofisionomia e E_n é o fator de emissão para uma dada substância n de interesse (CO_2, CH_4 e material particulado). A Tabela 1 apresenta os parâmetros da Eq. (1) para as diferentes fitofisionomias.

Fitofisionomia	F_f (kg/m^2)	β_f
FF (floresta)	1,00	0,39
FS (savanna)	0,83	0,86
FC (campos)	0,71	0,87

Tabela 1: Carga de combustível e eficiência de combustão para as três fitofisionomias.

As áreas queimadas foram computadas pela área total num dado período corrigidas, proporcionalmente pela área afetada de cada fitofisionomia. As estimativas foram obtidas por processamento de imagens. Os fatores de emissão ($g_n/kg_{biomassa}$) sugeridos em [15] são:

$$E_{CO2} = 1833(CE) \quad (2)$$

$$E_{MP} = 69{,}9 - 70{,}9(CE) \quad (3)$$

$$E_{CH4} = 78{,}6 - 82{,}1(CE) \quad (4)$$

O parâmetro CE nas equações indica a eficiência de combustão e, conforme sugerido por [15], é de 94% para o bioma Cerrado.

Os dados de áreas queimadas utilizados neste estudo foram obtidos do produto aq30m, desenvolvido pelo INPE. Este produto oferece uma resolução espacial de 30 metros e é gerado pelo Programa Queimadas, com base em séries temporais de imagens dos satélites Landsat 8 e Landsat 9, ambos da coleção da USGS (United States Geological Survey). As imagens combinadas desses satélites são disponibilizadas a cada oito dias, enquanto os dados de áreas queimadas são atualizados quinzenalmente. A identificação das áreas queimadas é realizada por meio da combinação de índices espectrais de ondas médias, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Queimada Normalizada (NBR), em conjunto com técnicas de lógica linear e inteligência artificial.

3. RESULTADOS

As estimativas de áreas queimadas dos anos 2018 e 2019 foram provenientes do Programa Queimadas do INPE e podem ser visualizados na Figura 1.

Aplicando-se a metodologia para estimativa da área queimada, foram obtidos 6,56 e 11,08 milhões de hectares para os anos de 2018 e 2019, respectivamente. A fração de área queimada, em 2018, por fitofisionomia foi de 33,5%, 44,8% e 21,7% para, respectivamente, FC, FS e FF. Já para o ano 2019, estimou-se, 32,1%, 46,9% e 21,0% distribuídos, respectivamente, para FC, FS e FF. Tais resultados estão compatíveis com aqueles divulgados pelo MapBiomas, que foram de, 5,469 e 9,362 milhões de hectares para, respectivamente, os anos de 2018 e 2019 [16].

As áreas totais queimadas para as diferentes fitofisionomias encontram-se relatadas na Tabela 2.

Fitofisionomia	2018	2019
FF (floresta)	1,423	2,327
FS (savanna)	2,937	5,197
FC (campos)	2,196	3,557

Tabela 2: Áreas queimadas, em milhões de hectares, por fitofisionomia, para 2018 e 2019.

Emissão	2018	2019
CO_2	69,05	117,4
CH_4	0,057	0,097
MP	0,130	0,222
CO_2 total	70,25	119,4

Tabela 3: Emissões principais, em milhões de toneladas, para os anos de 2018 e 2019.

Com os dados de área queimada da Tabela 2, têm-se todos os parâmetros necessários para o cálculo das emissões empregando-se a Eq. (1). A Tabela 3 apresenta as emissões de dióxido de carbono, metano, material particulado e emissões totais equivalentes de CO_2. Esta última contabilizando-se a contribuição do metano.

4. DISCUSSÃO

Os resultados de emissões de dióxido de carbono variaram significativamente entre os anos de 2018 e 2019, conforme apresentado na Tabela 3. As emissões totais de CO_2 atingiram valores da ordem de 70 e 120 milhões de toneladas para os anos de 2018 e 2019, respectivamente. Para o ano de 2018, as emissões totais de dióxido de carbono tiveram a contribuição de 33,85%, 52,31% e 13,84% respectivamente para FC (gramíneas), FS (savana) e FF (floresta). Já para o ano de 2019, os resultados indicam uma participação de 32,4%, 54,4% e 13,32% respectivamente para FC (gramíneas), FS (savana) e FF (floresta). Verifica-se que a queimada na savana (FS) apresentou maior parcela das emissões, considerando que foi a maior área queimada, em ambos os anos. Além disto, a savana possui mais material combustível por área que os campos. No que diz respeito a eficiência de combustão, a savana e os campos limpos apresentam valores similares e bem superiores a área de floresta. De grande relevância para a área de saúde, tem-se que as emissões de material particulado são da ordem de milhares de toneladas.

5. CONCLUSÕES

No presente estudo apresentaram-se metodologias específicas para estimativas de emissão de gases do efeito estufa (metano e dióxido de carbono) e de material particulado com origem na queimada de três importantes fitofisionomias do Cerrado. As emissões equivalentes de dióxido de carbono alcaçaram níveis elevadíssimos no ano de 2019, superando a casa centena de milhões de toneladas.

As emissões de dióxido de carbono provenientes das queimadas no Cerrado são comparáveis às emissões anuais de CO_2 de setores industriais inteiros no Brasil, sublinhando a necessidade urgente de políticas públicas eficazes para a gestão do fogo e a preservação ambiental no país.

6. REFERÊNCIAS

[1] V. R. Pivello, I. Vieira, A. V. Christianini, D. B. Ribeiro, L. S. Menezes, C. N. Berlinck, F. Melo, J. A. Marengo ... & E. Overbeck. Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies, *Perspective in Ecology and Conservation*, 19(3):233-255, 2021.

[2] L. Eloy, I. B. Schmidt, S. L. Borges, M. C. Ferreira, & T. A. Dos Santos. Seasonal fire management by traditional cattle ranchers prevents the spread of wildfire in the Brazilian Cerrado, *Ambio*, 48:890-899, 2019.

[3] R. Baggio, G. E. Overbeck, G. Durigan, & V. D. Pillar. To graze or not to graze: A core question for conservation and sustainable use of grassy ecosystems in Brazil, *Perspectives in Ecology and Conservation*, 19(3):256-266, 2021.

[4] N. C. Marques, R. B. Machado, L. M. Aguiar, L. Mendonça-Galvão, R. Tidon, E. M. Vieira, ... & M. Bustamante. Drivers of change in tropical protected areas: Long-term monitoring of a Brazilian biodiversity hotspot, *Perspectives in Ecology and Conservation*, 20(2):69-78, 2022.

[5] G. Durigan. Zero-fire: Not possible nor desirable in the Cerrado of Brazil, *Flora*, 268:151612, 2020.

[6] I. B. Schmidt, L. C. Moura, M. C. Ferreira, L. Eloy, A. B. Sampaio, P. A. Dias, & C. N. Berlinck. Fire management in the Brazilian savanna: First steps and the way forward, *Journal of Applied Ecology*, 55(5):2094-2101, 2018.

[7] Lei nº 14.944, de 31 de julho de 2024. Disponível em: www2.camara.leg.br

[8] INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Banco de Dados de queimadas. Disponível em: terrabrasilis.dpi.inpe.br

[9] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: www.ibge.gov.br

[10] S. A. Spawn, C. C. Sullivan, T. J. Lark, & H. K. Gibbs. Harmonized global maps of above and belowground biomass carbon density in the year 2010, *Scientific Data*, 7(1):112, 2020.

[11] V. Avitabile, M. Herold, G. B. Heuvelink, S. L. Lewis, O. L. Phillips, G. P. Asner, ... & S. Willcock. An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets, *Global Change Biology*, 22(4):1406-1420, 2016.

[12] S. S. Saatchi, N. L. Harris, S. Brown, M. Lefsky, E. T. Mitchard, W. Salas, ... & A. Morel. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(24):9899-9904, 2011.

[13] A. G. S. J. Baccini, S. J. Goetz, W. S. Walker, N. T. Laporte, M. Sun, D. Sulla-Menashe, ... & R. Houghton. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps, *Nature Climate Change*, 2(3):182-185, 2012.

[14] L. Gomes, H. S. Miranda, D. V. Silvério, & M. M. Bustamante. Effects and behaviour of experimental fires in grasslands, savannas, and forests of the Brazilian Cerrado, *Forest Ecology and Management*, 458:117804, 2020.

[15] D. E. Ward, R. Susott, J. B. Kauffman, R. E. Babbitt, D. L. Cummings, B. Dias, ... & A. W. Setzer. Smoke and fire characteristics for cerrado and deforestation burns in Brazil: BASE-B experiment, *Journal of Geophysical Research*: Atmospheres, 97(D13):14601-14619, 1992.

[16] Projeto MapBiomas - Mapeamento das áreas queimadas no Brasil entre 1985 a 2023 - Coleção 3. Disponível em: plataforma.brasil.mapbiomas.org. Acesso em: 28 de outubro de 2024.