

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS DE INVENTÁRIOS DE EMISSÃO DE CO₂ NOS PROCESSOS DE QUEIMA DE BIOMASSA NA MATA ATLÂNTICA

Analysis of different methodologies for CO₂ emission inventories in biomass burning processes in the Atlantic Forest

Maria Eduarda Dias Pereira

Graduanda em Geografia - Bacharelado pela Universidade Federal de São João Del Rei, Brasil

maria.eduarda@worldenvironmentalconservancy.org

Jean Euzébio Lima Oliveira

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geografia pela Universidade Federal de Alfenas, Brasil

jean.lima@sou.unifal-mg.edu.br

Karen Vitória de Andrade

Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais pela Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

karenvitoria15@outlook.com.br

Gabriel Pereira

Doutor em Geografia Física pela Universidade de São Paulo, Brasil

pereira@ufsj.edu.br

Luciana Bassi Marinho Pires

Doutora em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil

luciana.pires@worldenvironmentalconservancy.org

Recebido: 01/02/2026

Aceito: 15/04/2026

Resumo

O monitoramento das emissões de CO₂ provenientes de queimadas é essencial para compreender o ciclo do carbono e os impactos socioambientais na Mata Atlântica. Entretanto, diferenças metodológicas entre inventários podem gerar estimativas divergentes, comprometendo a interpretação da dinâmica dos incêndios. Este estudo compara os inventários QFED, GFED e GFAS, utilizando decomposição temporal, análise sazonal e avaliação espacial por estado. Os resultados mostram alta heterogeneidade espaço-temporal, com São Paulo, Minas Gerais, Bahia e Paraná como os maiores emissores, além de um pico sazonal na primavera. O GFED apresentou maior extensão espacial, apesar de contabilizar, no total, menor quantidade de CO₂ emitido, enquanto o GFAS e o QFED destacam eventos de alta energia e subestimam queimas de baixa intensidade. Essas divergências refletem diferentes processos socioambientais, principalmente no uso e na cobertura do solo, em cada estado, o que destaca a grande diversidade desses processos na Mata Atlântica.

Palavras-chave: Mata Atlântica, Emissões, CO₂, Inventários, Análise espaço-temporal.

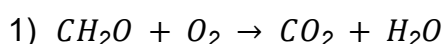
Abstract

Monitoring CO₂ emissions from wildfires is essential for understanding the carbon cycle and socio-environmental impacts in the Atlantic Forest. However, methodological differences between inventories can generate divergent estimates, compromising the interpretation of fire dynamics. This study compares the QFED, GFED, and GFAS inventories, excluding temporal variation, seasonal analysis, and spatial assessment at the state level. The results show high spatio-temporal heterogeneity, with São Paulo, Minas Gerais, Bahia, and Paraná as the largest emitters, and a seasonal peak in the spring. The GFED expands the spatial extent despite accounting for a lower total amount of CO₂ emitted, whereas the GFAS and QFED highlight high-energy events and underestimate low-intensity wildfires. These divergences reflect different socio-environmental processes, mainly land use and land cover, for each state, highlighting the great diversity of processes in the Atlantic Forest.

Keywords: Atlantic Forest, Emissions, CO₂, Inventories, Spatiotemporal analysis.

1. INTRODUÇÃO

A queima de biomassa é extremamente comum na América do Sul, especialmente como resultado de alguns processos antropogênicos (Andreae, 1991). No Brasil, em particular, embora a queima seja comumente associada ao desmatamento e à agricultura, a dinâmica é extremamente complexa ao longo do tempo e também pode estar associada a outros processos, como impactos climáticos de eventos extremos e secas severas. No caso da Amazônia, para áreas florestais, a umidade relativa e a temperatura são os principais fatores climáticos que possibilitam o início de um incêndio. Isso resulta na emissão de uma quantidade considerável de partículas e gases tóxicos na atmosfera a partir do processo de combustão e, no caso do processo completo, são emitidos CO₂ e vapor de água (H₂O):



No Brasil, a dinâmica dos incêndios é complexa e ainda mais amplificada por influências climáticas, incluindo eventos extremos como o ENOS (El Niño-Oscilação Sul) e o Modo Anular do Sul (Holz *et al.*, 2017). Com o aquecimento global, prevê-se que esses fenômenos se intensifiquem, aumentando a frequência dos incêndios por meio de temperaturas extremas e padrões de precipitação alterados (Fasullo *et al.*, 2018). As últimas décadas mostram uma intensificação acentuada dos regimes de incêndios na América do Sul, com o prolongamento da estação propensa a incêndios no sul da Amazônia em 27% a 94% entre 1979 e 2019 devido a condições mais secas (JONES *et al.*, 2022). A variabilidade da área queimada está fortemente ligada aos déficits hídricos, onde secas

severas amplificam exponencialmente a propagação do fogo, principalmente em regiões tropicais úmidas (Chuvieco *et al.*, 2021). As projeções futuras indicam um aumento da atividade de incêndios, independentemente das mudanças no uso da terra, à medida que o aquecimento global reduz a resiliência dos ecossistemas (Daniau *et al.*, 2012).

Contudo, apesar destes eventos criarem condições favoráveis aos incêndios, as atividades humanas são as principais causas da ignição dos incêndios nos biomas brasileiros. Neste caso, ressalta-se o processo de conversão florestal e manutenção dos sistemas agrícolas, onde as queimadas estão majoritariamente próximas de infraestrutura urbana (Aragão *et al.*, 2016; Neto; Evangelista, 2022). O manuseio do fogo, especialmente para estas atividades, pode comprometer a meta de redução das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) para o país (Junior *et al.*, 2020), especialmente porque a queima de biomassa é o segundo maior contribuidor nas emissões de CO₂ no mundo após os combustíveis fósseis (Van Der Werf, 2010).

Apesar de apresentar menor contribuição nas emissões totais, a Mata Atlântica ainda representa importante papel no cenário nacional ao abrigar aproximadamente 16% do seu remanescente florestal e ao abrigar uma grande diversidade de infraestrutura antrópica, incluindo grandes reservatórios, capitais estaduais e classes agrícolas, como a cana de açúcar (Ribeiro *et al.*, 2009). Ao contrário de alguns biomas, como o Cerrado, as espécies da Mata Atlântica, em geral, não têm adaptações evolutivas ao fogo, o que as torna particularmente vulneráveis aos danos induzidos pelo fogo (Singh; Huang, 2022). Historicamente, o fogo não era um fator ecológico dominante neste bioma, mas as atividades humanas alteraram drasticamente essa dinâmica (Souza *et al.*, 2022). Além disso, ainda consta-se que o uso do fogo, em sua maioria, para os campos, apesar de frequentes, são em maioria ilegais (Herrmann *et al.*, 2023).

Em função disso, uma alternativa amplamente utilizada para avaliar quantitativamente o impacto dos incêndios sobre o ciclo do carbono é o uso de inventários de emissão de gases e aerossóis. Esses inventários integram informações sobre as queimadas que possibilitam estimar o fluxo de gases-traço e aerossóis resultantes da queima de biomassa e revelar padrões espaço-temporais da ocorrência de incêndios. No entanto, as diferenças metodológicas entre eles resultam em estimativas divergentes, que podem, como resultado, apresentar diferentes aspectos da dinâmica dos incêndios. Neste trabalho, objetiva-se, portanto, justamente explorar essas discrepâncias como uma oportunidade de investigação: analisar como cada inventário representa o ciclo sazonal, a variabilidade interanual e a distribuição espacial das emissões, e discutir em que medida essas

diferenças ajudam a compreender melhor os processos socioambientais associados às queimadas na Mata Atlântica. Com isso, pretende-se contribuir para a reflexão sobre quais parâmetros e conceitos deveriam ser incorporados em inventários futuros para aprimorar a representação do fenômeno e reduzir incertezas nas estimativas de emissões.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

A Mata Atlântica é reconhecida como a segunda maior floresta pluvial tropical das Américas e se distribui por 15 estados do Brasil, estando distribuída especialmente pela região costeira do país até a região central de Minas Gerais. Este bioma ocupa cerca de 1,4 milhão de km² no território nacional e figura entre os principais *hotspots* de biodiversidade do planeta, apesar de sofrer pressões constantes (Câmara; Galindo-Leal, 2005). Para além de sua enorme importância ecológica, a Mata Atlântica sustenta a vida de mais de 150 milhões de pessoas, fornecendo serviços ecossistêmicos indispensáveis, como o abastecimento de água, a geração de energia hidrelétrica, entre outros fatores, além de parte da agropecuária nacional (Joly; Metzger; Tabarelli, 2014). Atualmente, é composta por um grande mosaico de atividades antrópicas e classes naturais (Figura 1).

2.2. Inventários de Emissão

2.2.1. GFED

O Global Fire Emissions Database (GFED4.1s) (Randerson *et al.*, 2018) fornece estimativas mensais das emissões globais de incêndios desde 1997 até ao presente, com uma resolução espacial de 0,25°. O inventário é constituído a partir da abordagem de Seiler e Crutzen (1980) com o modelo *Carnegie-Ames-Stanford-Approach* (CASA), que calcula fluxos de carbono. O conjunto de dados combina a área queimada da Coleção MODIS MCD64A1, para emissões pós 2000, e detecções de incêndios ativos dos sensores VIIRS e ATSR, para o pré-2000. As emissões computadas pós 2016 foram baseadas nos focos ativos do MODIS ao invés da área queimada, devido a mudanças na coleção lançada posteriormente. Os fatores de emissão seguem valores específicos do bioma de Akagi *et al.* (2011) e Andreae e Merlet (2001). O GFED usa dados de focos ativos do MODIS para estimar as emissões de incêndios abaixo do limite de detecção de áreas queimadas do MODIS, que contribuem com 35% adicionais das emissões totais nas regiões tropicais (Van Der Werf *et al.*, 2017).

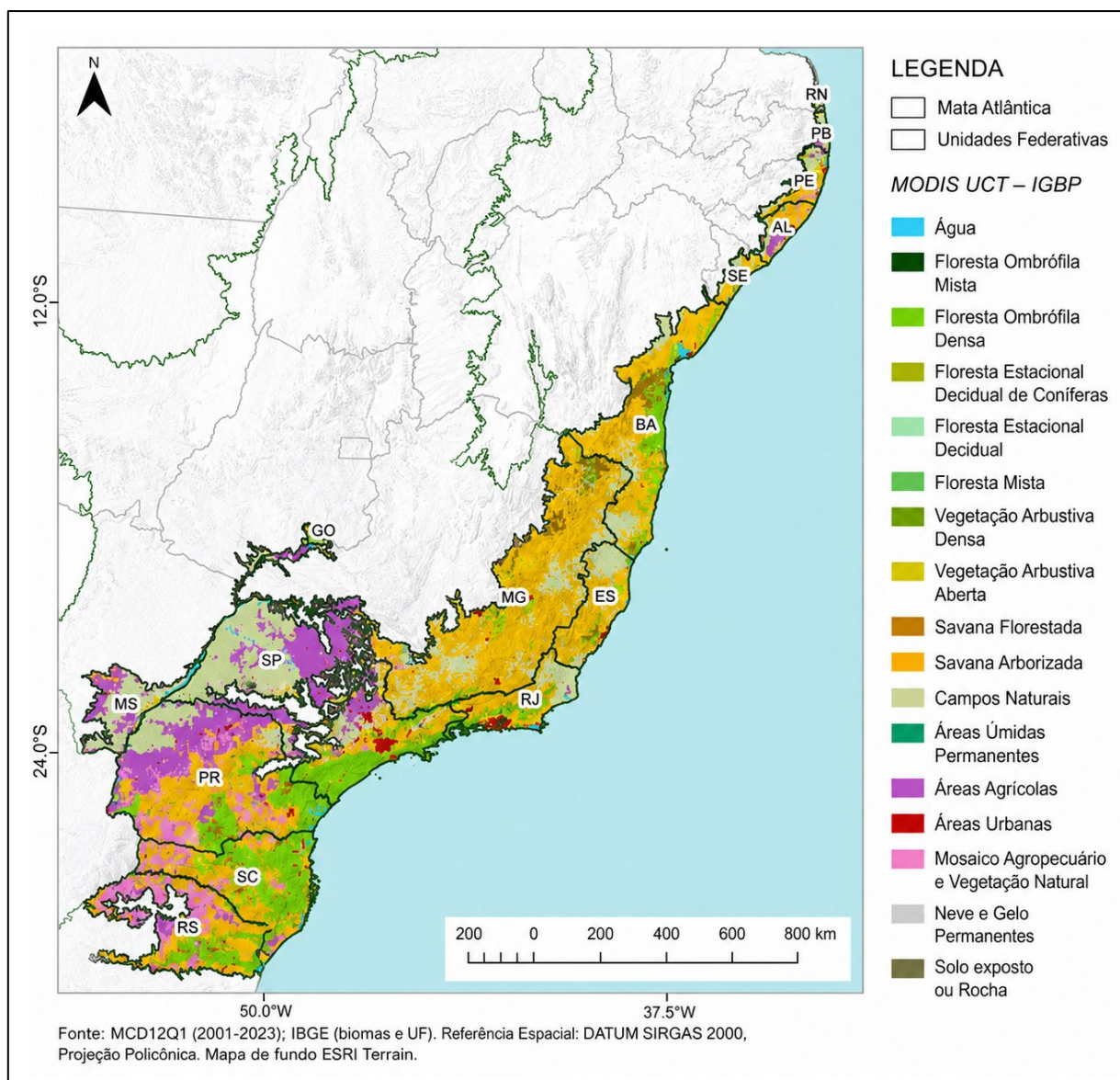


Figura 1 - Uso e Cobertura da Terra para a Mata Atlântica.
Fonte: Elaboração dos autores (2025).

2.2.2. GFAS

O Global Fire Assimilation System (GFASv1.2) processa observações quase em tempo real da Potência Radiativa do Fogo (FRP) do MODIS Terra/Aqua (2000–presente), com uma resolução de 0,1° na versão mais recente. A FRP é a quantificação da energia radiativa liberada por uma queimada em uma determinada unidade de tempo, e é utilizada em algumas metodologias de inventários pois é quantitativamente associada com a quantidade de aerossóis emitida. O modelo estima a FRP a partir da equação 3:

$$2) \quad FRP = \frac{\sum_k \sum_{ik \in j} F_{ik} \cdot \cos^2(\theta_{ik})}{\sum_k \sum_{ik \in j} A_{ik} \cdot \cos^2(\theta_{ik})}$$

Onde F_i é a FRP observada pelo MODIS, A_i é a área do pixel, θ_i é o ângulo zenital do sensor. Os índices i e k representam, respectivamente, o pixel e o produto usado (MOD14 ou MYD14). O conjunto de dados também utiliza os fatores de emissão de Andreae e Merlet (2001) e é validado com medições de CO realizadas por aeronaves, demonstrando um viés médio e $\pm 15\%$ em regiões tropicais (Kaiser *et al.*, 2012).

2.2.3. QFED

O Quick Fire Emissions Dataset (QFEDv2.5) (DARMENOV; SILVA, 2015) é otimizado para previsões de qualidade do ar quase em tempo real no modelo GEOS da NASA. Ele incorpora os dados de fogo ativo do MOD e MYD14 e aplica fatores de emissão com base no produto MODIS Land Cover Type (MCD12Q1) a partir da localização das queimadas. Sua metodologia se baseia, além da FRP, na correção de nuvens para os pixels observados, e implementa os coeficientes e fatores de emissão de Andreae e Merlet (2001). Para atender ao modelo GEOS, o QFED atribui uma correção de sistema de aerossóis para uso no modelo. Além da série histórica, ele também disponibiliza dados recentes das emissões.

2.3. Procedimentos Metodológicos

Para a análise das emissões atmosféricas, os dados dos inventários foram selecionados apenas para a variável CO₂ e para o período de 2003 a 2022. Inicialmente, os dados de cada inventário foram agregados espacialmente para a escala estadual (Figura 1). Além disso, para identificar padrões sazonais, foram calculadas as somas de emissões por estação do ano, gerando séries temporais sazonais para cada inventário.

Buscando fazer uma avaliação do padrão espaço-temporal das emissões, foi realizada uma decomposição das séries estaduais para cada inventário por meio da função *seasonal_decompose*, do pacote *statsmodels*, da linguagem Python, para um período de doze meses, focando na variabilidade interanual. O modelo escolhido de decomposição foi o aditivo, visto que não foi observado crescente incremento nas emissões ao longo dos anos em nenhum dos estados (Hyndman; Athanasopoulos, 2018). Esta abordagem pressupõe que a série temporal (Y) pode ser representada como a soma de três componentes distintas: tendência (T), sazonalidade (S) e resíduo (R), conforme a equação:

$$3) Y = T + S + R$$

A componente de tendência T captura as variações de longo prazo na série, enquanto a componente sazonal S representa padrões cíclicos periódicos, repetidos ao longo do tempo. O resíduo R refere-se à variação não explicada pelas componentes de tendência e sazonalidade, representando ruídos ou flutuações aleatórias. A estimativa da tendência é obtida por médias móveis centradas, e a componente sazonal é calculada subtraindo-se a tendência da série original e computando a média de cada período sazonal (Chatfield, 2003; Cleveland *et al.*, 1990). O resíduo é então determinado pela diferença entre a série original e a soma das componentes de tendência e sazonalidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados aqui revelam uma marcada heterogeneidade espaço-temporal nas emissões de CO_2 em todo o bioma, com São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Bahia sendo os estados com as maiores contribuições (Figura 2), com, em média, 592, 463, 270 e 165 Tg CO_2 , emitidos para todo o período, respectivamente. O pico sazonal na primavera observado em todos os inventários é relacionado com o período de ocorrência de queimadas, que é tipicamente mais alto entre agosto e outubro, um período associado a condições mais secas e com calendários agrícolas, por exemplo, antes ou depois da colheita. Em geral, as emissões concentram-se em áreas com significativa atividade antrópica, e em especial para o Brasil, a ocorrência de queimadas tende a estar ligada com alterações no uso e cobertura (Aragão *et al.*, 2016). As emissões, especialmente para o verão (DJF), outono (MAM) e primavera (SON) são as que mais espacialmente se relacionam com áreas de forte atividade agrícola, sendo também constituídas por um mosaico com vegetação natural (Figura 3).

Quanto aos padrões sazonais das emissões, as áreas de acordo entre todos os inventários são, respectivamente, os estados do Rio Grande do Norte (RN), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Alagoas (AL) e Sergipe (SE), para o Verão (DJF), o noroeste de São Paulo (SP) e parte de Santa Catarina (SC) e do Rio Grande do Sul (RS), para o Outono (MAM), enquanto o inverno foi a estação que apresentou maior discordância espacial, com padrões espaciais semelhantes mas com quantidade total de CO_2 emitido bastante distinta. Quanto à primavera, todos os inventários estão em concordância quanto às emissões no nordeste e sudeste do Brasil, com algumas variações para as provenientes do estado de São Paulo (SP) e as da região Sul em geral (Figura 3).

As diferenças observadas entre os inventários fornecem questionamentos adicionais sobre a natureza das queimadas detectadas na Mata Atlântica. Emissões mais intensas e

especialmente extensas do GFED para algumas estações (Figura 3) provavelmente reflete sua dependência do mapeamento de áreas queimadas, que pode ser ineficiente. As abordagens de área queimada são adequadas para capturar queimadas grandes, de menor intensidade ou de longa duração, mas podem super-representar emissões onde queimadas pequenas, frequentes ou irregulares são agregadas ou onde algoritmos de área queimada têm maior sensibilidade. Brennan *et al.* (2019) aponta que, para pelo menos um tipo de uso, diversos produtos de área queimada apresentam incertezas excessivas, o que inclui o MCD64A1, que é utilizado como input para o GFED, com 11% para áreas agrícolas. A área relativa à Mata Atlântica também apresentou em geral bastante incerteza para o produto (Brennan *et al.*, 2019).



Figura 2 - Emissões de CO₂ para as UFs inseridas na Mata Atlântica.

Fonte: Elaboração dos autores (2025).

Em contraste, tanto o GFAS quanto o QFED são sistemas baseados em FRP, e, portanto, enfatizam incêndios de alta energia e chamas ativas que produzem fortes sinais térmicos, sendo mais diretamente relacionados com o consumo do combustível (PAN *et al.*, 2020). Como os métodos de FRP medem a intensidade instantânea do fogo, os inventários baseados nessa metodologia podem apresentar emissões mais baixas em regiões ou estações dominadas por baixas concentrações de FRP, mas com queimadas especialmente extensas, especialmente devido ao limiar mínimo de 9 a 11 MW para os produtos MOD14 e MYD14, ambos dados de base dos dois inventários (Schroeder *et al.*, 2010). Além disso, a FRP ainda apresenta sensibilidade em relação à cobertura vegetal, ou

seja, há diferença entre a potência emitida e a capturada pelo sensor (Schroeder *et al.*, 2010). Essa pode ser uma das razões pelo qual os dois inventários capturaram maiores emissões, em geral, do que o GFED, para todos os estados, caso as queimadas tenham, sazonalmente, um alto valor de FRP.

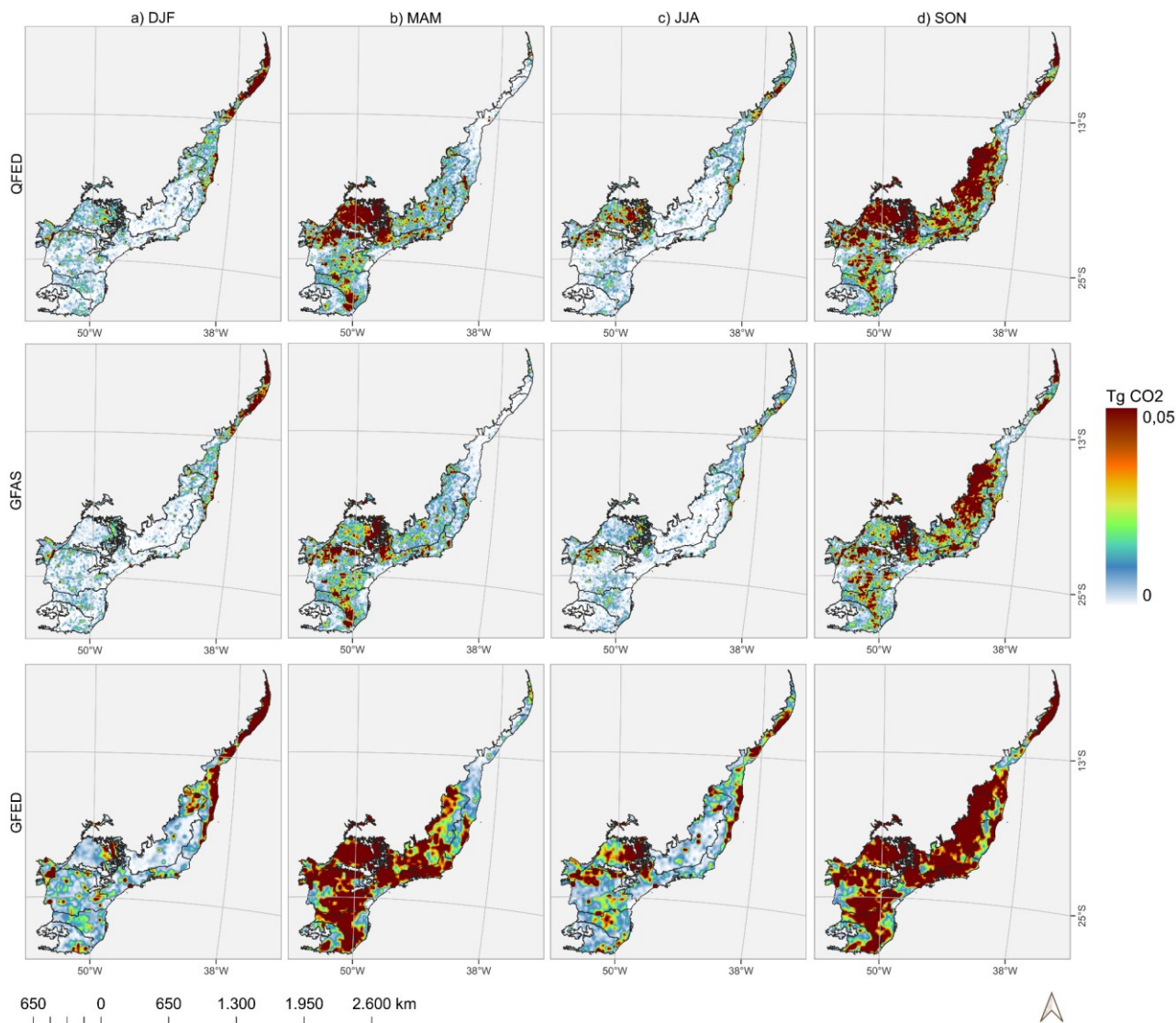


Figura 3 - Emissões sazonais totais por inventário.
Fonte: Elaboração dos autores (2025).

A componente sazonal resultante do processo de decomposição (Figura 4) demonstra maior intensidade cíclica anual especialmente para São Paulo (SP), Minas Gerais (MG), Paraná (PR), Bahia (BA), Alagoas (AL) e Santa Catarina (SC) (Figura 4), especialmente em função dos mosaicos agrícolas e de pastagens (Baião *et al.*, 2023). Vale observar que as maiores componentes observadas foram capturadas pelo QFED e o GFED, em relação ao GFAS. O QFED, diferentemente de outros inventários, possui maior habilidade em capturar picos específicos de emissão, o que pode estar relacionado com este forte padrão sazonal (Hua *et al.*, 2024).

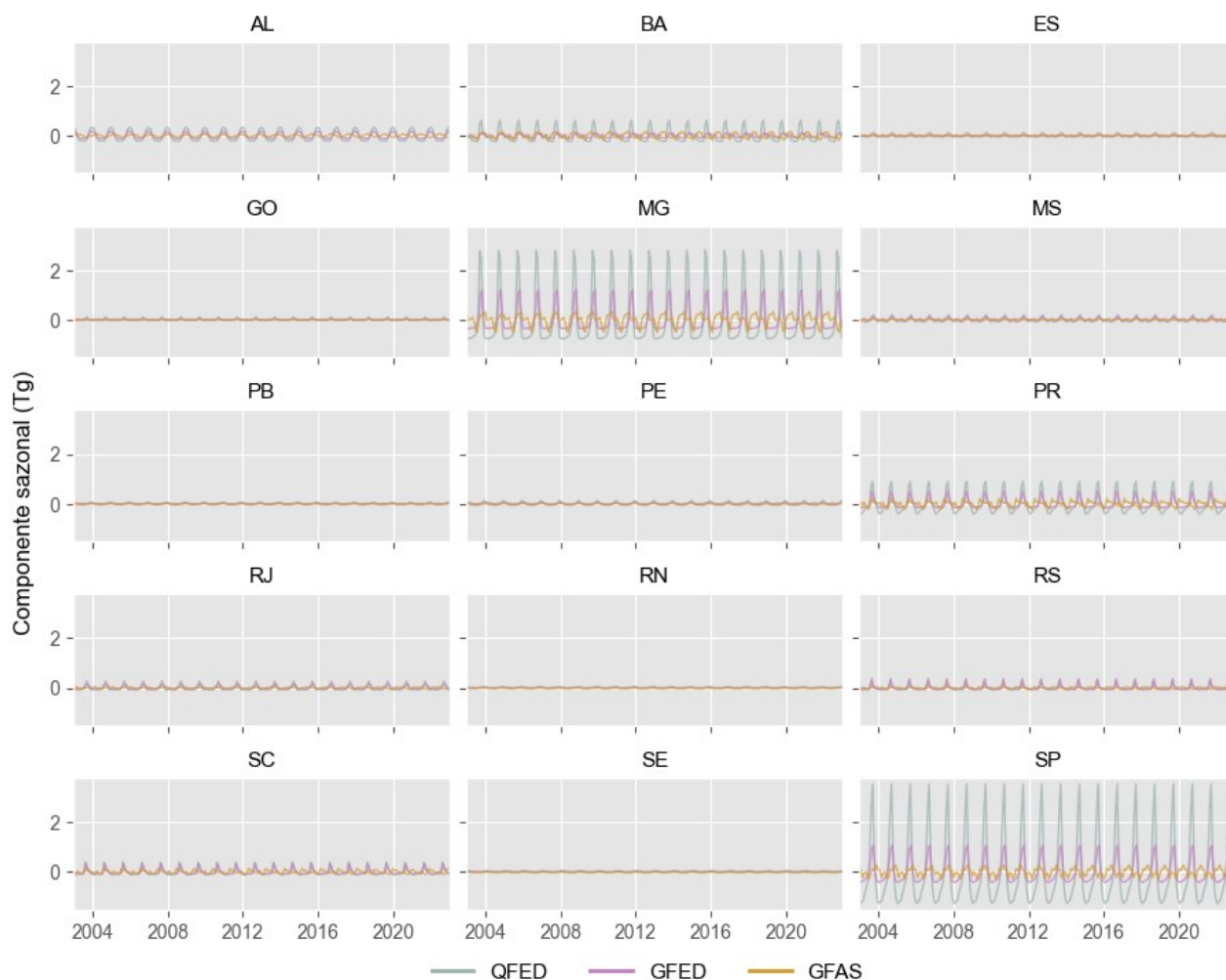


Figura 4 - Componente sazonal proveniente da decomposição da série temporal.

Fonte: Elaboração dos autores (2025).

Quanto à componente da tendência (Figura 5), foi observado um padrão muito similar ao citado anteriormente para as emissões totais. O QFED e o GFAS apresentam, temporalmente, uma dinâmica muito similar para todos os estados, apenas com uma diferença significativa para o estado de São Paulo (SP). Essa diferença pode se dar em função dos fatores de escalonamento de AOT para as florestas e savanas (Darmenov; Silva, 2015), o que significa que são queimadas provavelmente associadas com grandes emissões de aerossóis na atmosfera. Além disso, outro fator que indica ser algo relacionado à algum fator específico da ocorrência de queimadas e não sobre discordâncias metodológicas mais gerais, é o fato do padrão ter sido observado apenas para este estado de maneira significativa, e também estar sendo mais significativo para os anos mais recentes em Minas Gerais.

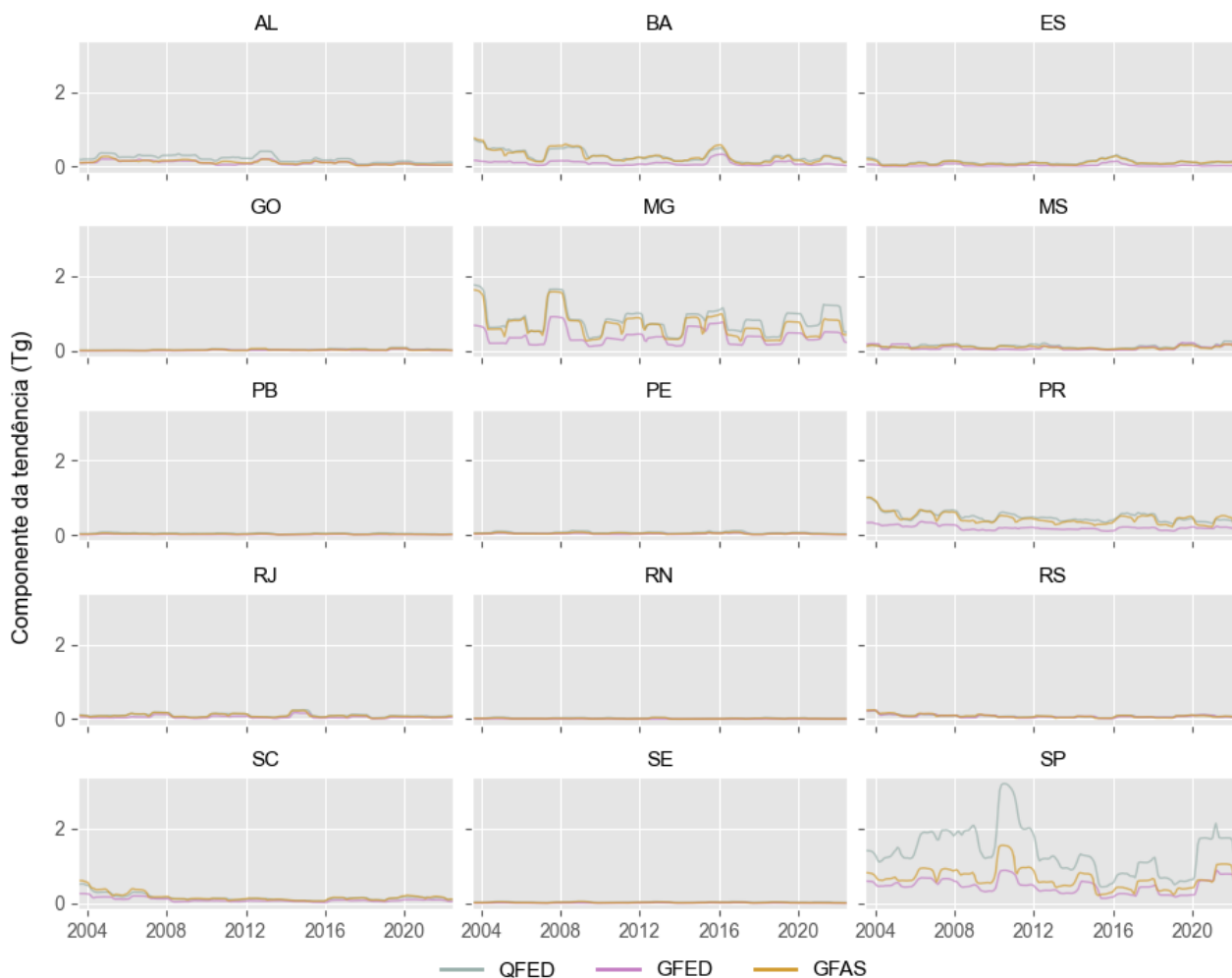


Figura 5 - Componente da tendência proveniente da decomposição da série temporal.

Fonte: Elaboração dos autores (2025).

Por último, quanto aos residuais (Figura 6), verificou-se que o QFED comumente apresentou valores negativos, diferentemente dos outros inventários, onde o GFED e o GFAS tiveram maior acordo temporal. Para os estados que mais emitem, os períodos que mais tiveram residuais, tanto positivos como negativos foram, respectivamente, 2010, 2011, 2017, 2020 e 2022 para São Paulo (SP) e 2003, 2005, 2007, 2010, 2011, 2012, 2014, 2015, 2017, 2019 e 2021, sendo Minas Gerais (MG) o estado com a maior quantidade de residuais. O inventário que foi melhor explicado pelo modelo foi o GFED, para todos os estados.

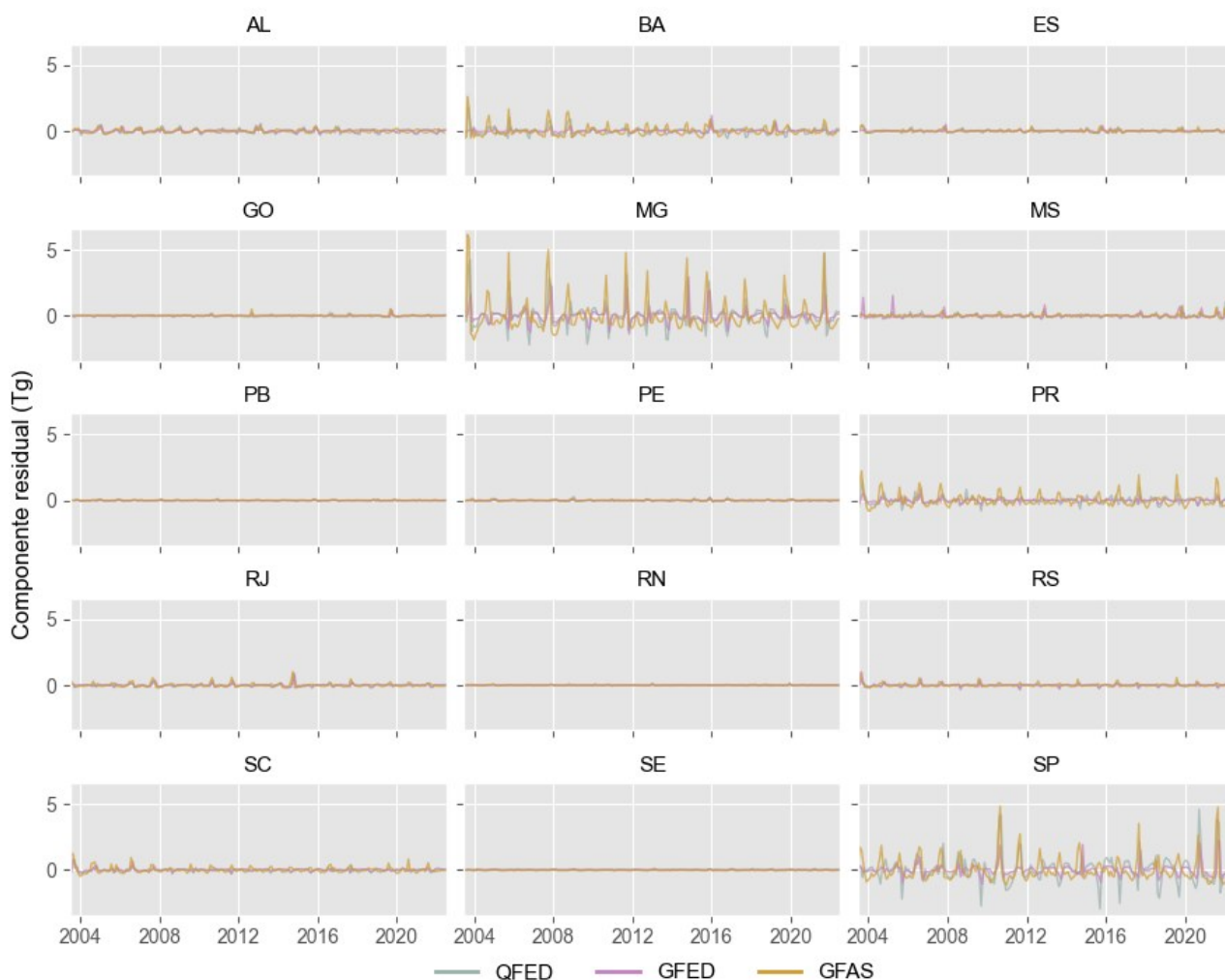


Figura 6 - Componente residual proveniente da decomposição da série temporal.

Fonte: Elaboração dos autores (2025).

Os picos sazonais observados são relacionados a um regime de fogo controlado por redução sazonal da umidade do combustível e por práticas agrícolas que utilizam as queimadas para limpeza de área. O GFED tende a agregar pequenas queimadas e, assim, a apresentar maior extensão espacial onde há muitos incêndios pequenos e frequentes, efeito já descrito em outros estudos (Van der Werf *et al.*, 2017; Chuvieco *et al.*, 2019). Em contraste, inventários baseados na FRP como o QFED e o GFAS realçam eventos de alta energia e podem sub-representar queimadas com maior extensão de baixa intensidade sob dossel fechado ou abaixo do limiar de detecção, devido à sensibilidade instrumental e à amostragem temporal dos sensores. Essas diferenças metodológicas explicam, portanto, as discrepâncias observadas entre os produtos em sua análise. Por isso, recomenda-se a aplicação de inventários provenientes de modelos regionais, como o PREP-CHEM-SRC, com o 3BEM e o 3BEM_FRP (Pereira *et al.*, 2016).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os diferentes mecanismos abordados pelos inventários apresentam profundos desafios a serem abordados quanto à ocorrência de queimadas. Em termos operacionais, é desejável a validação com sensores de alta resolução para pequenas queimadas, além de análises de sensibilidade a fatores de emissão, especialmente por características específicas do bioma que estão associadas com o manejo distinto do fogo em vista de outros biomas, como o Pantanal (Abreu et al., 2022). Além disso, as diferenças entre os inventários apontam que, para cada estado, podem existir, ainda, diferentes regimes do fogo, com diferentes tamanhos de queimada e potência emitida a partir da biomassa consumida, além das discrepâncias metodológicas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao projeto Science for the World, da World Environmental Conservancy, pelo financiamento que possibilitou a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABREU, M. C.; LYRA, G. B.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; SOUZA, A.; POBOČÍKOVÁ, I.; FRAGA, M. S.; ABREU, R. C. R. Temporal and spatial patterns of fire activity in three biomes of Brazil. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 844, p. 157138, 2022.

AKAGI, S. K.; YOKELSON, R. J.; WIEDINMYER, C.; ALVARADO, M. J.; REID, J. S.; KARL, T.; CROUNSE, J. D.; WENNERBERG, P. O. Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Göttingen, v. 11, n. 9, p. 4039–4072, 2011.

ALENCAR, A. A. C.; ARRUDA, V. L. S.; SILVA, W. V. D.; CONCIANI, D. E.; COSTA, D. P.; CRUSCO, N.; DUVERGER, S. G.; FERREIRA, N. C.; FRANCA-ROCHA, W.; HASENACK, H.; et al. Long-term Landsat-based monthly burned area dataset for the Brazilian biomes using deep learning. **Remote Sensing**, Basel, v. 14, n. 11, p. 2510, 2022.

ANDREAE, M. O. Biomass burning: its history, use and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In: LEVINE, J. S. **Global biomass burning: atmospheric, climatic, and biospheric implications**. Cambridge: MIT Press, 1991. p. 3–21.

ANDREAE, M. O.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 15, n. 4, p. 955–966, 2001.

ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; LIMA, A.; ARAI, E. Fires in Amazonia. In: NAGY, L.; FORSBERG, B. R.; ARTAXO, P. **Interactions between biosphere, atmosphere and human land use in the Amazon Basin**. Heidelberg: Springer, 2016. p. 301–329.

BAIÃO, C. F. P.; SANTOS, F. C.; FERREIRA, M. P.; BIGNOTTO, R. B.; SILVA, R. F. G.; MASSI, K. G. The relationship between forest fire and deforestation in the southeast Atlantic rainforest. **PLOS ONE**, San Francisco, v. 18, n. 6, p. e0286754, 2023.

BRENNAN, J.; GÓMEZ-DANS, J. L.; DISNEY, M.; LEWIS, P. Theoretical uncertainties for global satellite-derived burned area estimates. **Biogeosciences**, Göttingen, v. 16, n. 16, p. 3147–3164, 2019.

CÂMARA, I. D. G.; GALINDO-LEAL, C. **Mata Atlântica: biodiversidade, ameaças e perspectivas**. Belo Horizonte: Fundação SOS Mata Atlântica, 2005. 27p.

CARVALHO, L. Z. G.; MASSI, K. G.; COUTINHO, M. P.; MAGALHÃES, V. D. Fire effects on Atlantic Forest sites from a composition, structure and functional perspective. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 82, p. e259673, 2022.

CHATFIELD, C. **The analysis of time series: an introduction**. 6. ed. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2003. 352p.

CHUVIECO, E.; PETTINARI, M. L.; KOUTSIAS, N.; FORKEL, M.; HANTSON, S.; TURCO, M. Human and climate drivers of global biomass burning variability. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 779, p. 146361, 2021.

CHUVIECO, E.; MOUILLOT, F.; VAN DER WERF, G. R.; SAN MIGUEL, J.; TANASE, M.; KOUTSIAS, N.; GARCÍA, M.; YEBRA, M.; PADILLA, M.; GITAS, I.; HEIL, A.; HAWBAKER, T. J.; GIGLIO, L. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 225, p. 45–64, 2019.

CLEVELAND, R. B.; CLEVELAND, W. S.; MCRAE, J. E.; TERPENNING, I. STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. **Journal of Official Statistics**, Stockholm, v. 6, n. 1, p. 3–73, 1990.

DANIAU, A.-L. et al. Predictability of biomass burning in response to climate changes. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 26, n. 4, 2012.

DARMENOV, A.; SILVA, A. **The Quick Fire Emissions Dataset (QFED)**. Greenbelt, Maryland: Goddard Space Flight Center, 2015. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20150001444>. Acesso em: 6 abr. 2025.

FASULLO, J. T.; OTTO-BLIESNER, B. L.; STEVENSON, S. ENSO's changing influence on temperature, precipitation, and wildfire in a warming climate. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 17, p. 9216–9225, 2018.

HERRMANN, P. B.; NASCIMENTO, V. F.; FREITAS, M. W. D.; OMETTO, J. P. Fire in highland grasslands in the Atlantic Forest Biome, a burned areas time series analysis and its correlation with the legislation. **Frontiers in Remote Sensing**, v. 4, n. 16, 2023.

HOLZ, A.; PARITSIS, J.; MUNDO, I. A.; VEBLEN, T. T.; KITZBERGER, T.; WILLIAMSON, G. J.; ARÁOZ, E.; BUSTOS-SCHINDLER, C.; GONZÁLEZ, M. E.; GRAU, H. R.; QUEZADA, J. M. Southern annular mode drives multicentury wildfire activity in southern South America. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 114, n. 36, p. 9552–9557, 2017.

HUA, W.; LOU, S.; HUANG, X.; XUE, L.; DING, K.; WANG, Z.; DING, A. Diagnosing uncertainties in global biomass burning emission inventories and their impact on modeled air pollutants. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 24, n. 11, p. 6787–6807, 2024.

HYNDMAN, R. J.; ATHANASOPOULOS, G. **Forecasting: principles and practice**. OTexts. 2018. 442p.

KAISER, J. W.; HEIL, A.; ANDREAE, M. O.; BENEDETTI, A.; CHUBAROVA, N.; JONES, L.; MORCLETTE, J.-J.; RAZINGER, M.; SCHULTZ, M. G.; SUTTIE, M.; VAN DER WERF, G. R. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. **Biogeosciences**, v. 9, n. 1, p. 527–554, 2012.

JOLY, C. A.; METZGER, J. P.; TABARELLI, M. Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: ecological findings and conservation initiatives. **New Phytologist**, Lancaster, v. 204, n. 3, p. 459–473, 2014.

JONES, M. W.; ABATZOGLOU, J. T.; VERAVERBEKE, S.; ANDELA, N.; LASSLOP, G.; FORKEL, M.; SMITH, A. J. P.; BURTON, C.; BETTS, R. A.; VAN DER WERF, G. R.; SITCH, S.; CANADELL, J. G.; SANTÍN, C.; KOLDEN, C.; DOERR, S. H.; LE QUÉRE, C. Global and regional trends and drivers of fire under climate change. **Reviews of Geophysics**, v. 60, n. 3, 2022.

JUNIOR, C. A. S.; TEODORO, P. E.; DELGADO, R. C.; TEODORO, L. P. R.; LIMA, M.; PANTALEÃO, A. A.; BAIIO, F. H. R.; AZEVEDO, G. B.; AZEVEDO, G. T. O. S.; CAPRISTO-SILVA, G. F.; ARVOR, D.; FACCO, C. U. Persistent fire foci in all biomes undermine the Paris Agreement in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, p. 16246, 2020.

NETO, N. M.; EVANGELISTA, H. Human activity behind the unprecedented 2020 wildfire in Brazilian wetlands (Pantanal). **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 888578, 2022.

PAN, X.; ICHOKU, C.; CHIN, M.; BIAN, H.; DARMENOV, A.; COLARCO, P.; ELLISON, L.; KUCSERA, T.; SILVA, A.; WANG, J.; ODA, T.; CUI, G. Six global biomass burning emission datasets: intercomparison and application in one global aerosol model. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 20, n. 2, p. 969–994, 2020.

PEREIRA, G.; SIQUEIRA, R.; ROSÁRIO, N. E.; LONGO, K. L.; FREITAS, S. R.; CARDOZO, F. S.; KAISER, J. W.; WOOSTER, M. J. Assessment of fire emission inventories during the South American Biomass Burning Analysis (SAMBBA) experiment. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, p. 6961–6975, 2016.

RANDERSON, J. T.; VAN DER WERF, G. R.; GIGLIO, L.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. S. Global Fire Emissions Database, Version 4 (GFEDv4). 2018. Disponível em: <https://daac.ornl.gov/FGEB/guides/GFED4.html>. Acesso em: 6 abr. 2025.

RIBEIRO, M. C.; METZGER, J. P.; MARTENSEN, A. C.; PONZONI, F. J.; HIROTA, M. M. The brazilian atlantic forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009.

SCHROEDER, W.; CSISZAR, I.; GIGLIO, L.; SCHMIDT, C. C. On the use of fire radiative power, area, and temperature estimates to characterize biomass burning via moderate to coarse spatial resolution remote sensing data in the Brazilian Amazon. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. 21, p. 21121, 2010.

SEILER, W.; CRUTZEN, P. J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. **Climatic Change**, v. 2, n. 3, p. 207-247, 1980.

SINGH, M.; HUANG, Z. Analysis of Forest Fire Dynamics, Distribution and Main Drivers in the Atlantic Forest. **Sustainability**, v. 14, n. 2, p. 992, 2022.

SOUZA, C. R.; MAIA, V. A.; MARIANO, R. F.; SOUZA, F. C.; ARAÚJO, F. C.; PAULA, G. G. P.; MENINO, G. C. O.; COELHO, P. A.; SANTOS, P. F.; MOREL, J. D.; SANTOS, R. M. Tropical forests in ecotonal regions as a carbon source linked to anthropogenic fires: A 15-year study case in Atlantic forest – Cerrado transition zone. **Forest Ecology and Management**, v. 519, p. 120326, 2022.

VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; COLLATZ, G. J.; MU, M.; KASIBHATLA, P. S.; MORTON, D. C.; DEFRIES, R. S.; JIN, Y.; VAN LEEUWEN, T. T. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, p. 11707–11735, 2010.

VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; VAN LEEUWEN, T. T.; CHEN, Y.; ROGERS, B. M.; MU, M.; VAN MARLE, M. J. E.; MORTON, D. C.; COLLATZ, G. J.; YOKELSON, R. J.; KASIBHATLA, P. S. Global fire emissions estimates during 1997–2016. **Earth System Science Data**, v. 9, p. 697–720, 2017.

Recebido: 01/02/2026
Aceito: 15/04/2026