



Análise temporal do fluxo de carbono utilizando sensoriamento remoto no Oeste da Bahia

Paula Cristiane Souza ARAGÃO ¹, Fábio Correa ALVES ^{*1}, Elvis Bergue Mariz MOREIRA ¹,
Suzy Magaly Alves Cabral de FREITAS ¹, Cassiano Gustavo MESSIAS ²

¹ Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, BA, Brasil.

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.

*Email: alves.fabioc@gmail.com

Submetido em: 26/02/2026; Aceito em: 01/04/2026; Publicado em: 22/04/2026.

RESUMO: A expansão agrícola no Cerrado tem reduzido o potencial de sequestro de carbono atmosférico da vegetação nativa. Este estudo avaliou a dinâmica do fluxo relativo de carbono (CO₂) entre 2002 e 2022 em um setor do Oeste da Bahia, com base em séries temporais de imagens Landsat. As imagens foram utilizadas para obter o índice de fluxo de CO₂, adotado como indicador do sequestro de carbono nas classes de vegetação natural e de agricultura, considerando apenas os pixels invariantes ao longo da série histórica do MapBiomias. As diferenças entre os períodos pré e pós-Lei nº 12.651/2012 foram avaliadas pelo teste de Wilcoxon pareado, enquanto as tendências temporais foram analisadas pelo teste de Mann-Kendall. As áreas de vegetação natural apresentaram valores positivos do índice, indicando maior potencial de sequestro de carbono, enquanto as áreas agrícolas exibiram valores próximos de zero ou negativos, atuando como sumidouros apenas durante o crescimento das culturas. O sequestro potencial foi maior no período de 2002 a 2011 do que no de 2013 a 2022, sem tendência temporal consistente ao longo da série. A redução do sequestro após 2012 pode estar associada à efetividade limitada do Novo Código Florestal e à persistente supressão da vegetação nativa no Cerrado baiano.

Palavras-chave: bioma Cerrado; uso e cobertura da terra; sequestro de CO₂; NDVI; Landsat.

Temporal analysis of carbon flux using remote sensing in Western Bahia

ABSTRACT: The expansion of agriculture in the Cerrado has reduced the potential for atmospheric carbon sequestration by native vegetation. This study evaluated the dynamics of relative carbon flux (CO₂) between 2002 and 2022 in a sector of western Bahia using Landsat image time series. The images were used to obtain the CO₂ flux index, adopted as an indicator of carbon sequestration in natural vegetation and agricultural classes, considering only invariant pixels throughout the historical series based on MapBiomias data. Differences between the pre- and post-Law No. 12,651/2012 periods were assessed using the paired Wilcoxon test, while temporal trends were analyzed with the Mann-Kendall test. Natural vegetation areas exhibited positive index values, indicating a higher carbon sequestration potential, whereas agricultural areas showed values close to zero or negative, acting as carbon sinks only during crop growth periods. Potential sequestration was higher from 2002 to 2011 than from 2013 to 2022, with no consistent temporal trend across the full series. The reduction in sequestration after 2012 may be associated with the limited effectiveness of the Brazilian Forest Code and the continued suppression of native vegetation in the Cerrado of Bahia.

Keywords: Cerrado biome; land use and land cover; CO₂ sequestration; NDVI; Landsat.

1. INTRODUÇÃO

A intensificação de atividades antrópicas no meio ambiente, como a supressão da vegetação nativa e sua conversão em áreas produtivas, tem provocado um aumento expressivo nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera (LIU et al., 2024). Esses processos estão diretamente associados às mudanças climáticas globais, especialmente ao aumento da temperatura média da Terra (GATTI et al., 2021). Dentre os gases emitidos, o dióxido de carbono (CO₂) contribui para o agravamento do efeito estufa (Gatti et al., 2021), apesar de desempenhar papel essencial no equilíbrio dos ciclos biogeoquímicos, em especial na fotossíntese. Nesse contexto, a vegetação desempenha um papel estratégico na regulação da concentração de CO₂

atmosférico, pois, durante a fotossíntese, as plantas absorvem CO₂ e liberam oxigênio, contribuindo para o sequestro e o armazenamento de carbono em sua biomassa (PAN et al., 2011).

O Cerrado é o segundo maior bioma do Brasil; ocupa cerca de 23% do território nacional e apresenta condições naturais favoráveis à agricultura, como a alternância bem definida entre as estações seca e chuvosa, relevo plano, solos com potencial para correção química e elevada disponibilidade de radiação solar, essencial à fotossíntese e ao sucesso das lavouras (SANO et al., 2020). Esses fatores, associados à escassez de terras agricultáveis nas regiões Sul e Sudeste do país e aos incentivos fiscais concedidos nas últimas décadas, contribuíram para a consolidação do

Cerrado como a principal fronteira agrícola brasileira. Entre as décadas de 1970 e o início dos anos 2000, a expansão agrícola ocorreu predominantemente na porção Centro-Sul do bioma, avançando, a partir dos anos 2000, em direção a uma nova fronteira agrícola, a região conhecida como MATOPIBA, que abrange os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (BOLFE et al., 2016). No entanto, essa expansão econômica tem causado sérios impactos socioambientais, comprometendo os serviços ecossistêmicos, como a regulação do clima, os ciclos das águas e o equilíbrio climático regional. Somam-se a isso o acirramento de vulnerabilidades sociais e a intensificação de conflitos fundiários, decorrentes da pressão sobre territórios de povos indígenas e comunidades tradicionais, como quilombolas, geraizeiros, sertanejos, vazanteiros, barranqueiros, quebradeiras de coco babaçu e povos de fundo e fecho de pasto. Tais grupos, cujos modos de vida dependem estritamente dos recursos naturais, frequentemente enfrentam a ausência de regularização de suas terras (PITTA; VEGA, 2017). Além disso, a redução da vegetação nativa para menos da metade da cobertura original (Mapbiomas, 2024; Almeida et al., 2025) tem contribuído significativamente para o aumento das emissões de CO₂ na atmosfera (BUSTAMANTE et al., 2012). Nesse contexto, torna-se cada vez mais necessária a adoção de metodologias eficazes de monitoramento da vegetação, com o objetivo de subsidiar estratégias de conservação e de uso sustentável da terra.

A promulgação da Lei nº 12.651/2012 marcou uma mudança significativa na regulação do uso e da proteção da vegetação nativa no Brasil, especialmente nos biomas como o Cerrado. O Novo Código Florestal (NCF) instituiu mecanismos, como o Cadastro Ambiental Rural e o Programa de Regularização Ambiental, com o objetivo de recuperar áreas degradadas e aprimorar o controle da supressão vegetal (BRASIL, 2012). Embora busque conciliar a produção agropecuária com a conservação ambiental, a lei também flexibilizou normas anteriores, como a anistia à supressão da vegetação realizada até 2008, o que gerou críticas de especialistas (SOARES-FILHO et al., 2014). Apesar dos avanços legais, a efetiva aplicação da lei e a fiscalização ainda representam desafios centrais para conter a conversão de áreas nativas e mitigar suas consequências climáticas. Suela et al. (2024) analisaram os efeitos do NCF na proteção da vegetação nativa no Cerrado, com foco no MATOPIBA. Os autores concluíram que, embora a legislação tenha avançado na regulamentação ambiental e nos instrumentos de controle, sua aplicação permanece insuficiente para conter a conversão de áreas nativas. O estudo evidencia que a flexibilização das exigências de Reserva Legal no bioma intensificou o desmatamento nessa fronteira agrícola, que concentrou uma expressiva perda de vegetação entre 2010 e 2022, e ressalta a urgência de políticas públicas integradas e sensíveis às especificidades regionais.

Com o intuito de viabilizar o controle da supressão vegetal estabelecido pelo NCF, o uso de dados e técnicas de sensoriamento remoto tornou-se uma ferramenta essencial no monitoramento ao longo das últimas décadas, especialmente em áreas extensas ou de difícil acesso, como grande parte do Cerrado (BENDINI et al., 2019; OLDONI et al., 2020). Entre as técnicas usualmente empregadas, destacam-se os índices de vegetação (IVs), como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI), pela simplicidade e eficácia

na detecção de mudanças temporais na cobertura vegetal e na estimativa de parâmetros biofísicos (GAMON et al., 1997). A combinação desses índices permite calcular o índice de fluxo de CO₂ (Rahman et al., 2000), que pode ser utilizado como indicador da eficiência do sequestro de carbono pela vegetação, conforme estudos prévios (SILVA; BAPTISTA, 2019; PEREIRA et al., 2020; DELLA-SILVA et al., 2022). Apesar disso, ainda são escassos os estudos que exploram o potencial desse índice no Cerrado, especialmente com o uso de séries temporais extensas, como as do programa Landsat. Além disso, faltam análises que avaliem a dinâmica do CO₂ em diferentes classes de uso e de cobertura da terra, em períodos anteriores e posteriores à Lei nº 12.651/2012. Estudos sobre o potencial de sequestro de carbono pela vegetação são fundamentais para subsidiar políticas de proteção e recuperação da cobertura vegetal, visando manter os níveis de sequestro de CO₂ e mitigar as emissões de gases de efeito estufa na atmosfera.

A região oeste da Bahia, em especial, a área abrangida pela bacia do rio Grande, majoritariamente inserida no bioma Cerrado, apresenta características que a tornam adequada à aplicação do índice de fluxo de CO₂. Em função da expressiva expansão do agronegócio, essa região demanda monitoramento contínuo para investigar os impactos sobre a vegetação, especialmente quanto às variações temporais de seu comportamento e à dinâmica do sequestro de carbono. Nesse contexto, o objetivo principal deste estudo foi analisar a dinâmica do fluxo de CO₂ em áreas de vegetação natural e de agricultura na região da bacia do rio Grande, no Oeste baiano, com base em índices espectrais derivados de séries temporais de imagens Landsat no período de 2002 a 2022.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área de estudo corresponde a um tile de imagem Landsat (órbita 220/ponto 068). Esta área está localizada no oeste do estado da Bahia (Figura 1), inserida no bioma Cerrado, e integra a bacia hidrográfica do rio Grande, um importante afluente do rio São Francisco. Com ~ 31.700 km², a área abrange nove municípios: Luís Eduardo Magalhães, Barreiras, São Desidério, Formosa do Rio Preto, Riachão das Neves, Angical, Cotegipe, Santa Rita de Cássia e Catolândia. A região caracteriza-se pela predominância de relevo plano, com extensas superfícies conhecidas localmente como chapadões, que favorecem a mecanização agrícola e a implantação de grandes empreendimentos do agronegócio (OLDONI et al., 2020; SANO et al., 2020).

As fitofisionomias do Cerrado podem ser agrupadas em formações florestais, savânicas e campestres (RIBEIRO; WALTER, 2008). Na área de estudo, há domínio da formação savânica (51 %), com base na análise de pixels invariantes do MapBiomas (2024). As formações savânicas apresentam dosséis mais abertos, com domínio de vegetação arbustiva e rasteira (RIBEIRO; WALTER, 2008).

2.2. Aquisição e processamento das imagens de satélite

Os dados utilizados neste estudo incluíram imagens de satélite dos sensores TM (Landsat-5) e OLI (Landsat-8). As imagens multiespectrais, com resolução espacial de 30 m nas bandas do azul, verde, vermelho e NIR, pertencem à Coleção 2, Nível 2, e foram obtidas por meio da plataforma EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Foi analisada uma série temporal de 20 anos, compreendendo o

período entre 2002 e 2022 (Tabela 1), que abrange duas décadas de intensas transformações no uso e na cobertura da

terra na região, marcadas pela expansão agrícola e pelo aumento nos valores de supressão da vegetação nativa.

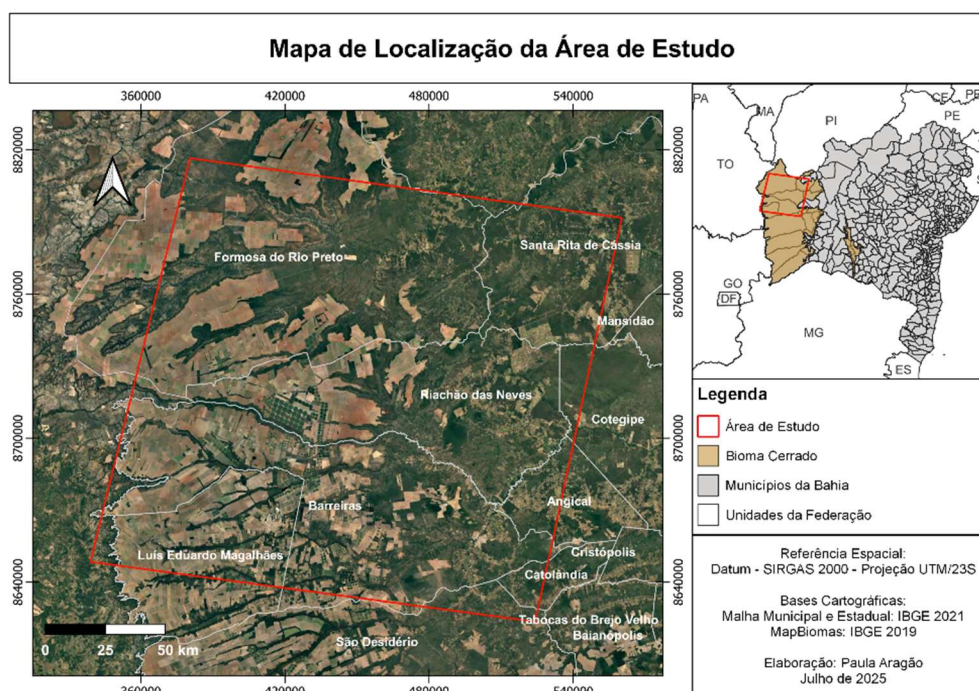


Figura 1. Localização da área de estudo no oeste do estado da Bahia.

Figure 1. Location of the study area in the Western of the state of Bahia.

Para o Landsat-5, foram utilizadas imagens de 2002 a 2011 e para o Landsat-8, o recorte temporal foi de 2013 a 2022. A seleção das cenas baseou-se nos seguintes critérios: (i) imagens com no máximo 20% de cobertura de nuvens de modo a garantir a qualidade radiométrica; (ii) priorização de coleta de imagens no período seco, entre abril e setembro, a fim de minimizar a influência de variações climáticas sazonais e favorecer a detecção de áreas com vegetação esparsa ou em processo de degradação no Cerrado; e (iii) seleção de uma imagem por ano, permitindo a análise comparativa das mudanças no uso e cobertura da terra ao longo da série histórica. Essa escolha fundamenta-se na necessidade de manter a consistência temporal e reduzir a redundância de dados, garantindo uma amostragem anual capaz de evidenciar tendências de longo prazo nas dinâmicas de uso da terra.

Entretanto, algumas cenas não atenderam aos requisitos definidos e, portanto, não puderam ser obtidas para os meses de agosto e setembro (Tabela 1). Esse foi o caso das imagens de agosto de 2004, que apresentaram grande quantidade de plumas de fumaça, comprometendo a interpretação dos alvos. Neste ano, imagens com qualidade radiométrica aceitável foram encontradas apenas em maio. Situação semelhante ocorreu em 2002, quando a forte interferência atmosférica, causada pela cobertura de nuvens, impediu o uso das cenas de agosto. Neste ano, imagens adequadas foram identificadas apenas em abril.

Como etapas de pré-processamento, as imagens dos sensores TM e OLI tiveram os valores dos pixels transformados em valores físicos de reflectância de superfície (0 e 1). Os parâmetros de reescalonamento utilizados foram 0,0000275 (fator de escala) e -0,2 (offset), conforme o manual técnico do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS; [https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-](https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products)

2-level-2-science-products). Adicionalmente, foram tratados pixels espúrios resultantes do processo de conversão, nos quais valores fora da escala de reflectância foram truncados para 0 ou 1. Todas as etapas de processamento das imagens de satélite e de cálculo dos índices espectrais foram realizadas no Sistema de Informação Geográfica (SIG) QGIS.

Tabela 1. Datas das cenas e dos sensores utilizados na pesquisa.

Table 1. Dates of the scenes and sensors used in the study.

Landsat 5		Landsat 8	
03/04/2002	TM	23/08/2013	OLI
12/08/2003	TM	10/08/2014	OLI
10/05/2004	TM	29/08/2015	OLI
01/08/2005	TM	14/07/2016	OLI
04/08/2006	TM	02/08/2017	OLI
23/08/2007	TM	20/07/2018	OLI
25/08/2008	TM	08/08/2019	OLI
12/08/2009	TM	11/09/2020	OLI
15/08/2010	TM	13/08/2021	OLI
03/09/2011	TM	01/09/2022	OLI

A inspeção visual revelou que as cenas de 2002 e 2011, ambas do sensor TM, apresentavam nuvens e plumas de fumaça que afetavam a interpretação dos alvos. Nesses casos, foi necessária a aplicação de uma máscara para remover essas interferências. As máscaras foram produzidas com base no estabelecimento empírico de intervalos de fatiamento da banda do azul, que apresenta menor comprimento de onda e, conseqüentemente, maior sensibilidade aos efeitos atmosféricos. A área com informação útil foi reclassificada para o valor 1, e as regiões afetadas foram atribuídas a 'No Data' (sem informação), resultando em uma camada binária. Essa máscara foi multiplicada, individualmente, pelas bandas espectrais em níveis de reflectância.

2.3. Índice fluxo de carbono

A análise do sequestro de CO₂ foi realizada por meio do índice de fluxo de CO₂, utilizado como *proxy* para avaliar tendências anuais de mudança na cobertura de vegetação nativa decorrentes da expansão agrícola no Oeste da Bahia. Inicialmente, foi necessário o cálculo do NDVI (equação 1):

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+R} \quad (01)$$

em que: NIR é a banda do infravermelho próximo e RED é a banda do vermelho.

O NDVI se destaca por sua eficiência na detecção e no monitoramento da cobertura vegetal. Seus valores variam de -1 a +1, sendo que valores próximos de +1 indicam alta atividade fotossintética, valores próximos de -1 indicam presença de água ou de sombras de nuvens, enquanto valores próximos de 0 representam áreas com solo exposto.

O PRI (GAMON et al., 1997; equação 2) adaptado para dados multiespectrais (DELLA-SILVA et al., 2022) foi calculado da seguinte forma:

$$PRI = \frac{BLUE-GREEN}{BLUE+GREEN} \quad (02)$$

em que: BLUE é a banda do azul e GREEN é a banda espectral do verde.

O intervalo do PRI varia de -1 a 1, dependendo das condições fisiológicas e ambientais da vegetação (GAMON et al., 1997). A variação de valores neste intervalo, pode dificultar sua integração com modelos que requerem variáveis em escalas positivas, como 0 e 1. Para contornar essa limitação, tem-se a forma normalizada do PRI, o sPRI (RAHMAN et al. 2000; equação 3):

$$sPRI = \frac{(PRI+1)}{2} \quad (03)$$

Essa abordagem tem sido utilizada em estudos que integram índices espectrais em modelos de estimativa da produtividade primária ou do fluxo de CO₂ (TEOBALDO; BAPTISTA, 2016). Embora existam outras formas de escalar o PRI, como o uso de valores mínimos e máximos observados, a fórmula demonstrada acima é simples e não depende de parâmetros empíricos adicionais, o que favorece a reprodutibilidade dos resultados. Com base no NDVI e sPRI, tem-se o índice de fluxo de CO₂ (RAHMAN et al. 2000; equação 4):

$$\text{Fluxo de CO}_2 = (NDVI \times sPRI) \quad (04)$$

Os valores do índice de fluxo de CO₂ indicam a quantidade de CO₂ sequestrada pela vegetação em uma determinada área. Valores mais altos refletem maior magnitude de sequestro de CO₂ da atmosfera, associada à elevada atividade fotossintética e à maior eficiência no uso da luz. Por outro lado, valores próximos de zero ou negativos indicam baixa eficiência fotossintética e, conseqüentemente, menor capacidade de sequestro de CO₂ pela vegetação (RAHMAN et al., 2000).

2.4. Dados de uso e cobertura da terra e supressão da vegetação

Dados de uso e cobertura da terra serviram para comparar o comportamento temporal do índice de fluxo de

CO₂, com foco nas classes de vegetação natural e de agricultura. As informações de uso e cobertura da terra para o recorte espacial e temporal analisado foram obtidas por meio da plataforma MapBiomas (SOUZA JR et al., 2020). Os dados matriciais entre 2002 e 2022 foram obtidos da coleção 10, com resolução espacial de 30 m, por meio do *toolkit* disponibilizado no GEE (<https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas>).

A primeira etapa do processamento dos arquivos matriciais no ambiente SIG consistiu no recorte e na compatibilização entre as classes temáticas do MapBiomas e as adotadas na presente pesquisa. A classe “formação savânica” (código 4) do MapBiomas foi adotada como referência para a classe de vegetação natural, enquanto as demais fitofisionomias do Cerrado foram excluídas da análise por apresentarem ocorrência espacial limitada na área de estudo. As classes “soja” (código 39), “lavouras temporárias” (código 41), “lavouras perenes” (código 48) e “algodão” (código 62) foram agrupadas e consideradas representativas da classe “agricultura”. A classe “mosaico de usos” foi excluída da análise devido à sua elevada heterogeneidade. Em seguida, os pixels das classes de vegetação natural e de agricultura foram reclassificados em valores binários, de modo a isolar as classes de interesse. A classe vegetação natural recebeu o valor 0 e a classe agricultura recebeu o valor 1; as demais classes foram definidas como ‘No Data’, por não apresentarem informação relevante para o objetivo da análise.

Na sequência, aplicou-se uma operação aritmética de soma entre as imagens reclassificadas, com o objetivo de identificar os pixels que permaneceram invariantes ao longo dos 20 anos de análise, obtendo os seguintes padrões: i) agricultura: pixels com valor 21, ou seja, classificados como agricultura em todos os anos; ii) vegetação natural: pixels com valor 0, ou seja, classificados como vegetação natural em todos os anos; iii) transições entre as duas classes, com pixels com valores entre 1 e 20, indicando alternância entre vegetação natural e agricultura; e iv) presença de outras classes em algum ano, resultando em ‘No Data’, que foram descartados da análise. Os pixels invariantes foram convertidos em polígonos, selecionando-se áreas contíguas, bem distribuídas e com, no mínimo, 70 km². Ao final, identificaram-se 15 polígonos invariantes: 6 de vegetação natural (14.303 km²) e 9 de agricultura (2.871 km²; Figura 2).

As amostras foram distribuídas com base nos polígonos invariantes. Para cada classe invariante, foram geradas 1.000 amostras aleatórias, um número considerado adequado para representar a variabilidade espacial dos índices e assegurar a robustez das análises estatísticas. Os pontos alocados em pixels sem informação (*No Data*) ou nas bordas da cena foram removidos do conjunto. Como resultado, obtiveram-se 892 pontos para a classe de agricultura e 957 para a classe de vegetação natural (Figura 2).

As amostras aleatórias foram utilizadas para extrair estatísticas do índice de fluxo de CO₂ de cada classe, a partir de um arquivo em formato .csv que contém os identificadores dos pontos aleatórios e os respectivos valores do índice em cada ano. Esse arquivo foi posteriormente analisado no Excel e no ambiente R via RStudio, utilizando pacotes específicos (*tidyr*, *dplyr* e *ggplot2*) para a organização dos dados; cálculo das médias anuais e do desvio padrão; geração de gráficos de barras de erro; e elaboração das análises estatísticas.

Com o objetivo de investigar se os resultados obtidos com o índice de fluxo de CO₂ são realistas, dados de supressão da vegetação provenientes do Programa de Monitoramento Anual da Supressão da Vegetação Nativa no Cerrado (Prodes Cerrado), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), foram incorporados à análise. O Prodes fornece séries históricas de polígonos de supressão da vegetação nativa em escala nacional e para todos os biomas brasileiros (ALMEIDA et al., 2025). Para o Cerrado, os incrementos de supressão da vegetação estão disponíveis em uma série histórica bienal para o período de 2001 a 2012 e

anual a partir de 2013. Os dados foram obtidos na plataforma TerraBrasilis (acesso em: <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/>; ALMEIDA et al., 2025). Inicialmente, os polígonos de supressão foram filtrados para o período de 2002 a 2022. Em seguida, eles foram recortados aos limites da área de estudo, a fim de permitir a comparação das tendências locais com as observadas na supressão da vegetação no bioma Cerrado. Os incrementos anuais resultantes foram apresentados em gráficos de barras.

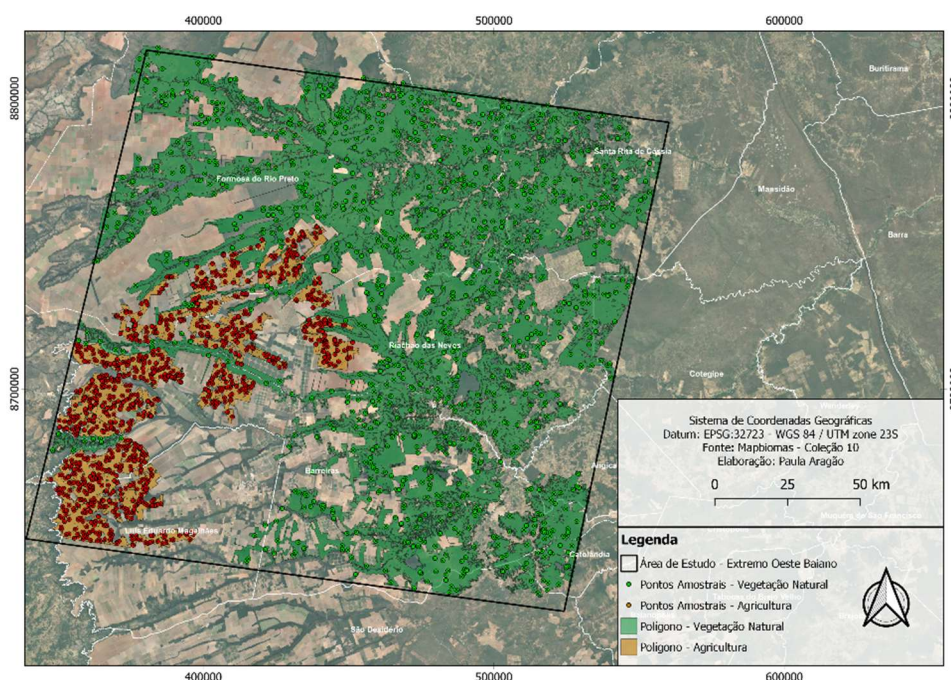


Figura 2. Distribuição geográfica dos polígonos invariantes (vegetação natural e agricultura) e dos pontos amostrais aleatórios.
Figure 2. Geographical distribution of invariant polygons (natural vegetation and agriculture) and random sample points.

2.5. Análises estatísticas

Para verificar diferenças estatísticas nos valores do índice entre os períodos anteriores (2002 e 2011) e posteriores (2013 e 2022) à vigência do NCF, aplicaram-se os testes de Shapiro-Wilk (normalidade; Razali et al., 2011) e de Wilcoxon pareado (SIEGEL; CASTELLAN JR, 2006). As análises foram realizadas com amostras aleatórias distribuídas nos polígonos invariantes de vegetação natural (Figura 2).

As seguintes etapas foram conduzidas para a aplicação dos testes estatísticos: (i) separação das amostras em formato .csv em dois conjuntos, correspondentes aos períodos anteriores e posteriores ao ano de 2012; (ii) cálculo das médias por ponto em cada período; e (iii) aplicação do teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade das diferenças entre os períodos. Nesse teste, a hipótese nula (H_0) assume a normalidade dos dados, enquanto a hipótese alternativa (H_1) indica desvio da normalidade. A decisão baseou-se no valor p (nível de significância ($\alpha = 0,05$)): como $p < 0,05$, rejeitou-se H_0 , indicando que os dados não apresentam distribuição normal (Tabela 2). Diante da ausência de normalidade, aplicou-se o teste não paramétrico de Wilcoxon ($\alpha = 0,05$), cuja H_0 assume que a mediana das diferenças é igual a zero, enquanto a H_1 indica diferença estatisticamente significativa entre os grupos.

A tendência temporal do índice de fluxo de CO₂ foi avaliada pelo teste de Mann-Kendall (THEN; HALIM, 2025), aplicado separadamente às classes de vegetação natural e de agricultura, a fim de identificar tendências monotônicas ao longo da série histórica. O teste verifica a H_0 de ausência de tendência significativa frente à H_1 de tendência monotônica, com interpretação baseada na estatística S e no coeficiente τ de Kendall (valores positivos indicam tendência crescente; negativos decrescente; e valores próximos de zero sugerem ausência de tendência). Adotou-se $\alpha = 0,05$, com intervalo de confiança de 95 %, e as análises foram realizadas no R (pacotes Kendall, trend e ggplot2).

3. RESULTADOS

3.1. Índices espectrais

A análise dos índices espectrais (NDVI, PRI e fluxo de CO₂) permitiu distinguir as duas classes de uso e cobertura da terra: áreas de vegetação natural, com maior densidade vegetal e biomassa, e áreas agrícolas, caracterizadas por menor cobertura vegetal e menor biomassa. De modo geral, as áreas agrícolas ocorreram predominantemente na porção Sudoeste da área de estudo, enquanto as áreas de vegetação nativa se destacaram especialmente nas porções norte, nordeste e sudeste (Figuras 3, 4 e 5).

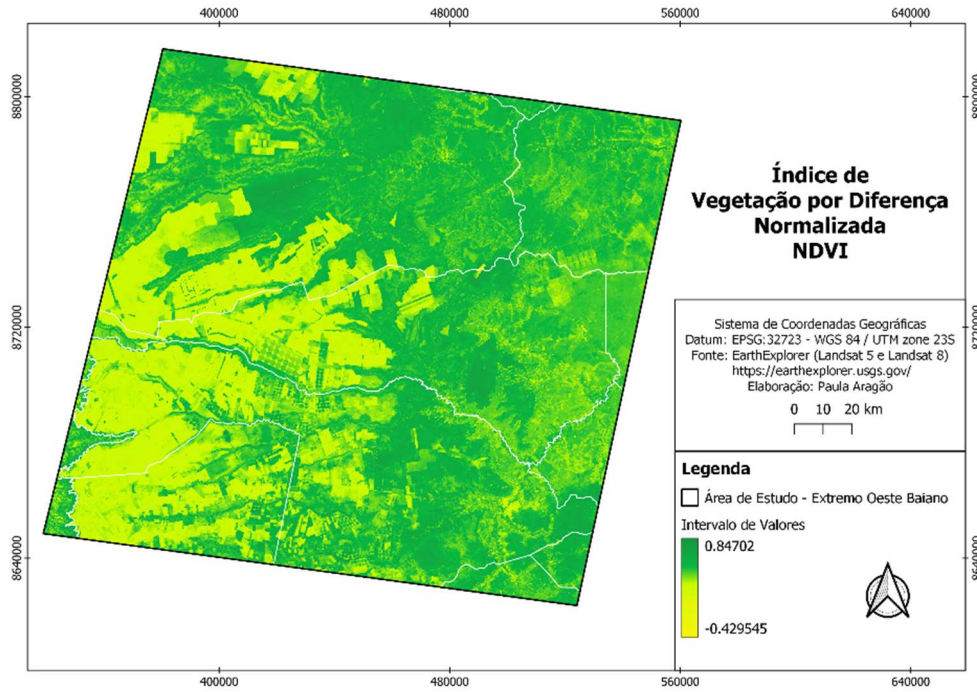


Figura 3. Distribuição espacial do NDVI médio no extremo Oeste baiano (2002-2022).
 Figure 3. Spatial distribution of mean NDVI in the far Western region of Bahia (2002-2022).

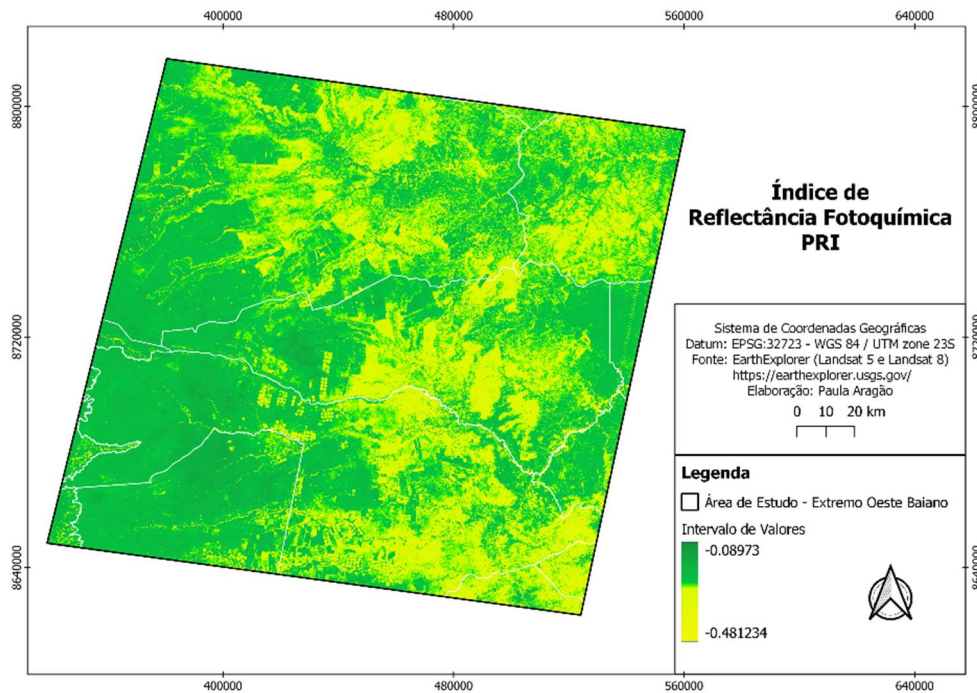


Figura 4. Distribuição espacial do PRI médio no extremo Oeste baiano (2002-2022).
 Figure 4. Spatial distribution of mean PRI in the far Western region of Bahia (2002-2022).

As médias dos valores de NDVI ao longo do período analisado variaram entre $\sim -0,43$ e $0,85$ (Figura 3). Os valores mais elevados e positivos refletem áreas com maior cobertura vegetal, elevada biomassa e alta atividade fotossintética, associadas principalmente aos remanescentes de vegetação nativa do Cerrado. Em contraste, os valores mais baixos, próximos de zero ou negativos, concentraram-se sobretudo em áreas de solo exposto e em corpos d'água, onde há ausência de cobertura vegetal. Valores intermediários de NDVI foram observados em áreas do Cerrado com vegetação esparsa ou em áreas agrícolas, identificadas nas

imagens de satélite por suas formas geométricas regulares, indicando superfícies com menor densidade foliar (Figura 3).

O índice PRI (Figura 4) revelou um padrão espacial semelhante ao observado para o NDVI, com a presença de aglomerados de pixels na porção sudoeste da área de estudo, decorrentes da forte ocupação agrícola característica da região. As médias do PRI ao longo da série temporal foram baixas e negativas, variando entre $-0,48$ e $-0,09$, com maior concentração no intervalo de $-0,30$ a $-0,20$. Especialmente, as áreas de vegetação nativa apresentaram valores ligeiramente mais baixos, geralmente entre $-0,25$ e $-0,40$, formando

padrões irregulares e fragmentados. As áreas agrícolas e as regiões com vegetação relativamente mais esparsa apresentaram valores entre -0,10 e -0,25.

Os índices NDVI e a variação do PRI (sPRI) foram utilizados como base para o cálculo do índice de fluxo de CO₂ (Figura 5a-d). Os valores médios desse índice variaram entre -0,12 e 0,29 ao longo da série analisada, evidenciando dois padrões principais: (i) áreas com valores negativos ou próximos de zero, indicando baixa capacidade de sequestro

de CO₂; e (ii) áreas com valores positivos, associados a maior atividade fotossintética e maior potencial de sequestro de carbono. As áreas de vegetação nativa apresentaram os valores mais elevados do índice, variando entre 0,18 e 0,29, especialmente nas regiões com maior continuidade estrutural do dossel (Figura 5d). Esses trechos correspondem às formações com dosséis mais fechados, que apresentam maior eficiência na assimilação de CO₂, mesmo sob condições de menor disponibilidade hídrica, como no período seco.

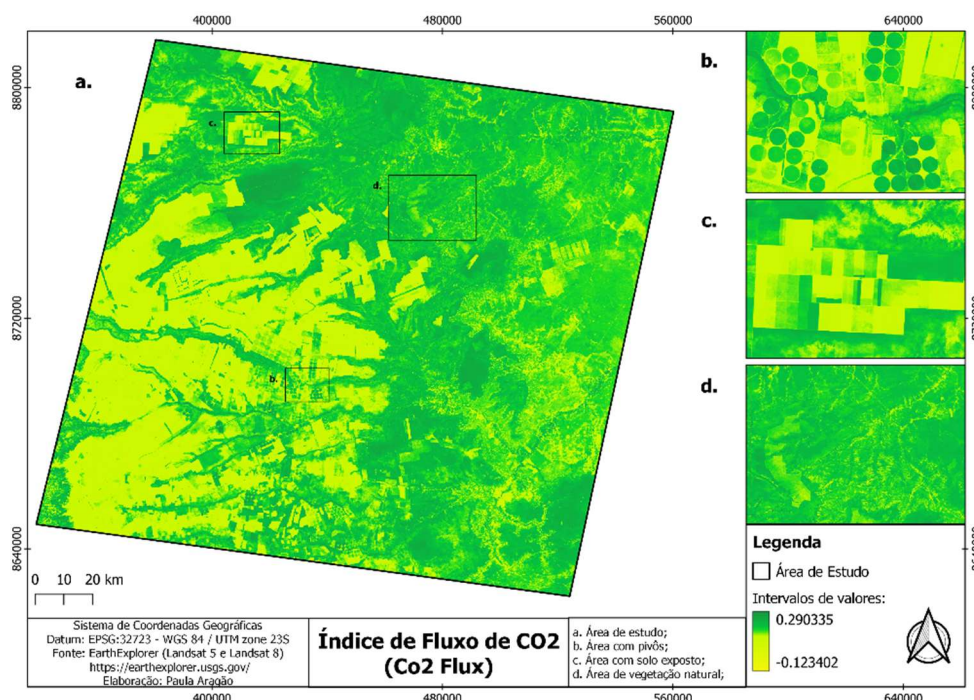


Figura 5. a) Distribuição espacial do fluxo médio de CO₂ no extremo oeste baiano (2002-2022). b-d) Detalhe do índice em setor com pivôs de irrigação (b); solo exposto (c) e vegetação natural (d).

Figure 5. (a) Spatial distribution of mean CO₂ flux in the far Western region of Bahia (2002-2022). (b-d) Close-up views of the index in areas with center-pivot irrigation (b), bare soil (c), and natural vegetation (d).

As regiões de solo exposto e as áreas agrícolas concentraram-se no intervalo de -0,12 a 0,05, formando aglomerados de pixels, principalmente na porção sudoeste da área de estudo (Figura 5a). Em escala de maior detalhe, observou-se que o comportamento do índice em áreas agrícolas irrigadas por pivôs apresentou valores intermediários, entre 0,10 e 0,18 (Figura 5b), aproximando-se dos valores registrados para a vegetação nativa. Essa resposta é compatível com a presença de culturas em pleno desenvolvimento vegetativo, como soja e algodão na região (OLDONI et al., 2020). Entretanto, a contribuição dessas culturas para o sequestro de carbono é temporária e limitada ao ciclo produtivo. Após a colheita, durante o período de pousio destinado à recuperação do solo, as áreas agrícolas podem tornar-se fontes potenciais de emissão de carbono, o que resulta em valores negativos no índice de fluxo de CO₂ (Figura 5c).

3.2. Dinâmica temporal do índice fluxo de CO₂ e testes estatísticos

A Figura 6 apresenta a análise dos valores médios e dos desvios-padrão da série temporal do índice de fluxo de CO₂ no período de 2002 a 2022. As médias do índice para a classe vegetação natural foram superiores às da classe agrícola em todos os anos avaliados, variando entre 0,14 e 0,22, com desvios-padrão ligeiramente mais elevados antes de 2012. Em

contraste, as áreas agrícolas apresentaram médias mais baixas, concentradas entre 0,07 e 0,15, com desvios-padrão levemente maiores após 2012. A principal exceção foi o ano de 2004, que registrou tanto a maior média quanto o maior desvio padrão da série temporal. Nesse ano, a imagem Landsat do sensor TM foi adquirida em maio. Devido à presença significativa de plumas de fumaça e/ou de cobertura de nuvens nos meses subsequentes, a radiometria dos alvos foi diretamente afetada. Portanto, a imagem deste ano pode não representar, de forma realista, o comportamento do índice no período seco.

A análise temporal das médias evidencia uma distinção clara entre as duas classes quanto à eficiência de sequestro de CO₂, sendo esta maior nas áreas de vegetação natural. Os valores médios do índice para a classe de vegetação natural foram mais elevados antes da entrada em vigor do NCF entre 2002 e 2011, embora tenham apresentado tendência decrescente e maior variabilidade. Após 2012, os valores tornaram-se mais uniformes, oscilando entre 0,15 e 0,20, com um leve aumento entre 2017 e 2019. Em síntese, a análise gráfica revelou: (i) desempenho superior das áreas de vegetação natural no sequestro de CO₂; e (ii) maior variabilidade interanual nas áreas agrícolas, decorrente dos ciclos de plantio e colheita, das diferenças entre culturas e dos estágios fenológicos, o que resulta em flutuações expressivas na capacidade de sequestro de CO₂.

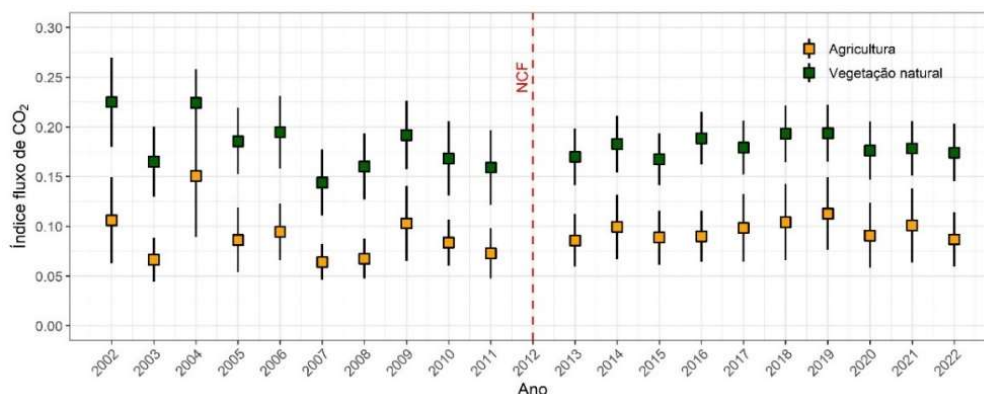


Figura 6. Barra de erros com as médias e os desvios-padrão do índice de fluxo de CO₂ em áreas de agricultura e de vegetação natural. A linha vertical pontilhada indica a entrada em vigor do Novo Código Florestal (NCF) em 2012.

Figure 6. Error bars showing the means and standard deviations of the CO₂ flux index for agricultural areas and natural vegetation. The vertical dashed line indicates the entry into force of the New Forest Code (NFC) in 2012.

A fim de avaliar se as médias do índice de fluxo de CO₂ diferem estatisticamente entre as classes de vegetação natural antes e após a vigência do NCF, aplicou-se inicialmente o teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos dados (Tabela 2). Assumindo $\alpha = 0,05$, rejeitou-se a H₀ (valor-p < 0,05), indicando que os dados não seguem uma distribuição normal. Diante disso, prosseguiu-se com o teste não paramétrico de Wilcoxon para comparar os grupos (SIEGEL; CASTELLAN JR., 2006).

Tabela 2. Testes de Shapiro-Wilk e de Wilcoxon aplicados ao índice de fluxo de CO₂, antes e após a vigência do Novo Código Florestal em 2012.

Table 2. Shapiro-Wilk and Wilcoxon tests applied to the CO₂ flux index before and after the enforcement of the New Forest Code in 2012.

Classe	n	Teste	Estatística	Valor-p
Floresta	957	Shapiro-Wilk	W = 0,92	<0,001*
		Wilcoxon	V = 246,557	0,042*

* = significativo a 5% de probabilidade. O teste de Shapiro-Wilk foi utilizado para avaliar a normalidade dos dados. O teste de Wilcoxon foi aplicado para comparar médias, considerando $\alpha = 0,05$.

O teste de Wilcoxon revelou um valor-p de 0,042 (Tabela 2), inferior ao α de 0,05, portanto, rejeita-se a hipótese nula de que a mediana das diferenças entre os grupos é igual a zero. Assim, conclui-se que há diferenças estatisticamente significativas nas medianas do índice de fluxo de CO₂ entre os períodos anterior e posterior à entrada em vigor do NCF em 2012.

A análise de tendência da série temporal do índice de fluxo de CO₂ para as classes de vegetação natural e de agricultura foi realizada com base no teste de Mann-Kendall (Figura 7). Para a classe vegetação natural, observou-se uma linha de tendência uniforme, enquanto a classe agricultura apresentou uma tendência linear levemente positiva, embora ambas as séries tenham mostrado oscilações interanuais. O intervalo de confiança de 95% das linhas de tendência permaneceu relativamente estreito para ambas as classes, indicando baixa variabilidade em torno das respectivas médias anuais do índice de fluxo de CO₂.

Os resultados do teste de Mann-Kendall foram: $\tau = -0,04$ e valor-p = 0,82 para a classe de vegetação natural; e $\tau = 0,18$ e valor-p = 0,25 para a classe de agricultura. Em ambos os casos, os valores de τ estão próximos de zero e os valores-p

são superiores ao α de 0,05, o que leva à aceitação da H₀, de ausência de tendência monotônica significativa. Portanto, ao considerar toda a série temporal (2002-2022), não há evidências estatísticas suficientes para confirmar tendências de aumento ou de diminuição do sequestro de carbono nas classes analisadas.

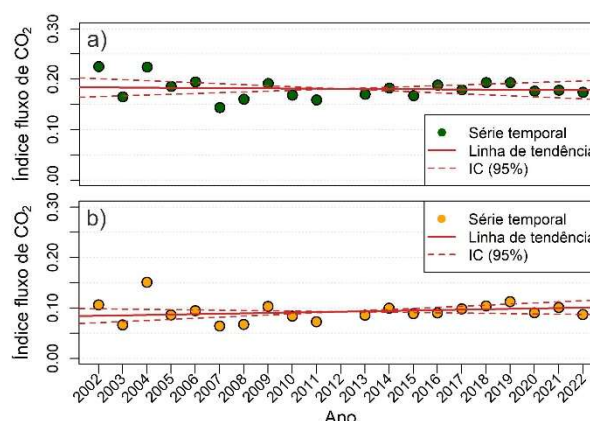


Figura 7. Análise de tendência por meio do teste de Mann-Kendall para as classes de vegetação natural (a) e de agricultura (b).

Figure 7. Trend analysis using the Mann-Kendall test for natural vegetation (a) and agriculture (b) classes.

4. DISCUSSÃO

4.1. Desempenho dos IVs em áreas de vegetação natural e agricultura

A área de estudo apresentou elevada heterogeneidade espectral, distinguindo dois grandes grupos: zonas agrícolas no setor sudoeste e áreas de vegetação natural savânica nos setores norte, nordeste e sudeste. As formações naturais exibiram os maiores valores de NDVI, enquanto as áreas agrícolas apresentaram valores baixos a intermediários, em função da alternância fenológica, de períodos de solo exposto e de práticas de manejo. Essa diferença reflete a dinâmica sazonal contrastante da biomassa e as intensas alterações no uso da terra (SANO et al., 2020).

O PRI, associado à eficiência de uso da luz na fotossíntese (GAMON, 1997), foi originalmente desenvolvido para dados hiperespectrais, mas tem sido adaptado a sensores multiespectrais, como o Landsat, com substituições de faixas espectrais (DELLA-SILVA et al., 2022). Diferenças nos valores do índice entre sensores e

classes de uso da terra são recorrentes (DELLA-SILVA et al., 2022). Neste estudo, o PRI apresentou valores predominantemente negativos, com a vegetação nativa apresentando valores ligeiramente inferiores aos das áreas agrícolas. Esse padrão pode estar relacionado à largura das bandas do Landsat, à mistura espectral e à sazonalidade climática.

As bandas azul e verde dos sensores TM e OLI são mais largas, o que reduz a sensibilidade do PRI às variações dos pigmentos fotossintéticos, de modo que o índice derivado do Landsat representa apenas uma aproximação do conceito original (GAMON et al., 1997). No Cerrado, a elevada heterogeneidade fisionômica e o dossel aberto intensificam o efeito do solo exposto, o que influencia a resposta espectral (RIBEIRO; WALTER, 2008). Como a análise foi realizada na estação seca, valores mais baixos de PRI na vegetação nativa podem indicar estresse hídrico e redução da eficiência fotossintética (ZHANG et al., 2017). Em contraste, áreas agrícolas irrigadas podem manter maior atividade fotossintética, o que contribui para os padrões observados nos índices espectrais, sensíveis às variações sazonais e aos ajustes fisiológicos induzidos pelo déficit hídrico (FURLANETTO; SILVA, 2017).

Segundo Gamon et al. (2023), o PRI funciona como um indicador óptico da eficiência do uso da luz fotossintética, da fotoproteção e do estresse nas plantas. A fotoproteção envolve o aumento da dissipação de energia excedente na forma de calor para evitar danos às plantas (GAMON et al., 2023). Dessa forma, valores reduzidos de PRI podem indicar maior participação das plantas na fotoproteção, em detrimento da eficiência fotossintética. Considerando que o período selecionado para as imagens corresponde à estação seca, a combinação de alta irradiância solar e de potencial déficit hídrico favorece exatamente esse tipo de dinâmica fisiológica.

4.2. Dinâmica espaço-temporal do fluxo de CO₂ em áreas de vegetação nativa e agrícolas

O índice de fluxo de CO₂ funciona como um indicador simplificado (*proxy*) dos modelos de eficiência do uso da luz (LUE) (Rahman et al., 2000) aplicados a dados de sensoriamento remoto. Na ausência de torres de fluxo de carbono e de informações complementares da vegetação necessárias à calibração, como no caso da área de estudo, o índice fornece padrões espaciais relativos e tem se mostrado útil para acompanhar a redução ou o aumento da atividade fotossintética e, conseqüentemente, da capacidade de sequestro de CO₂ pela vegetação (TEOBALDO; BAPTISTA, 2016; DELLA-SILVA et al., 2022).

Valores mais elevados do índice foram registrados nas áreas de vegetação natural, enquanto as áreas agrícolas, especialmente no setor Sudoeste, apresentaram valores inferiores, padrão semelhante ao observado em outras regiões do Cerrado (TEOBALDO; BAPTISTA, 2016). A correspondência espacial entre o NDVI e o fluxo de CO₂ indica que a integridade da cobertura vegetal influencia diretamente o sequestro de carbono. As áreas nativas apresentaram maior eficiência na assimilação de carbono e maior resiliência fisiológica, reforçando seu papel como sumidouros mais estáveis, conforme apontado na literatura (LOPES; MIOLA, 2010).

Áreas agrícolas, sobretudo com solo exposto, apresentaram valores negativos do índice, indicando baixa capacidade de estocagem de carbono, em razão da

descontinuidade do dossel, dos ciclos fenológicos curtos e do manejo agrícola. Contudo, áreas irrigadas por pivôs apresentaram valores semelhantes aos da vegetação nativa, sugerindo assimilação momentânea de carbono. Ainda assim, por se tratarem de culturas temporárias, como soja e algodão no Oeste baiano (OLDONI et al., 2020), o carbono acumulado tende a retornar à atmosfera, o que limita sua contribuição para o sequestro de longo prazo no Cerrado (ROSSI et al., 2022).

Temporalmente, observou-se o mesmo padrão espacial: áreas de vegetação natural apresentam valores do índice de fluxo de CO₂ superiores aos registrados em áreas agrícolas (Figura 6). No entanto, o sequestro de CO₂ nas áreas de vegetação nativa foi potencialmente maior entre 2002 e 2011, período que apresentou leve tendência decrescente. Já entre 2013 e 2022, os valores apresentaram um comportamento mais estável. Quando considerado todo o intervalo temporal, entretanto, as estatísticas do teste de *Mann-Kendall* indicam ausência de tendência significativa de aumento ou de diminuição do sequestro de carbono (Figura 7). Ressalta-se que essa análise se baseou em um conjunto limitado de dados multiespectrais, obtidos em escala anual, referentes ao período de 2002 a 2022.

O teste de *Wilcoxon* (Tabela 2) indicou que a diferença entre as medianas dos valores do índice para áreas de vegetação nativa, quando se comparam os períodos anteriores e posteriores à vigência do NCF (Lei nº 12.651/2012; BRASIL, 2012), é estatisticamente significativa. Esse resultado sugere que, na área analisada, a implementação da lei não foi acompanhada de um aumento efetivo na proteção da vegetação no Cerrado, o que se reflete na incapacidade de manter o sequestro de carbono atmosférico em patamares comparáveis ao período anterior ou de elevar os estoques/fluxos de carbono assimilado. Porém, a estabilidade observada nos valores médios de fluxo de CO₂ após 2012, aliada à ausência de declínio significativo, sugere que, ao menos nos polígonos invariantes analisados, não houve distúrbio na vegetação suficiente para comprometer o sequestro de carbono.

Em consonância com Pereira et al. (2020), verifica-se que a integridade estrutural da vegetação está associada a uma maior eficiência no sequestro de carbono. Enquanto no Parque Nacional das Nascentes do Rio Parnaíba predominaram fluxos positivos (-0,05 e 0,33), no Oeste baiano observou-se maior amplitude negativa e heterogeneidade espacial (-0,12 a 0,29), especialmente em áreas agrícolas e em solos expostos. Além disso, não foi identificada tendência de aumento no sequestro ao longo da série temporal, sugerindo que a fragmentação e a conversão da vegetação nativa têm limitado o potencial de assimilação de carbono. Esse contraste reforça a importância da manutenção de uma cobertura vegetal contínua e funcionalmente ativa para sustentar fluxos positivos mais consistentes de CO₂.

4.3. Causas prováveis para as variações no fluxo de CO₂ no Oeste baiano

Conforme discutido anteriormente, a análise temporal do índice de fluxo de CO₂ em áreas de vegetação natural revelou dois padrões distintos antes e após a vigência do NCF em 2012 (Figura 6). No período anterior à legislação, observam-se valores mais elevados do índice, o que indica maior atividade fotossintética e, conseqüentemente, maior potencial de sequestro de carbono. Após 2012, os valores

tornam-se relativamente mais baixos, sugerindo uma redução da atividade fotossintética e, conseqüentemente, da capacidade de sequestro de carbono. Essas variações no fluxo de CO₂ podem ser explicadas, ao menos em parte, pela dinâmica de supressão da vegetação nativa observada no Oeste baiano no período analisado (Figura 8).

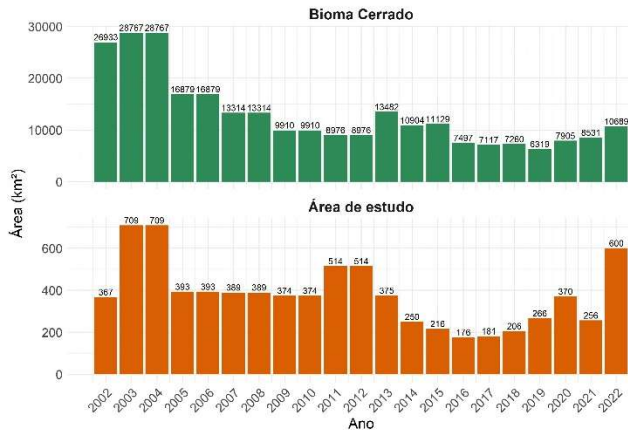


Figura 8. Área anual de supressão de vegetação no bioma Cerrado e na área de estudo entre 2002 e 2022, com base nos dados do Prodes Cerrado (ALMEIDA et al., 2025).

Figure 8. Annual area of vegetation suppression in the Cerrado biome and in the study area between 2002 and 2022, based on Prodes Cerrado data (ALMEIDA et al., 2025).

Tanto o bioma Cerrado quanto o recorte da área de estudo apresentaram oscilações marcantes nas áreas anuais de supressão entre 2002 e 2022. No bioma Cerrado (Figura 8), observou-se um pico expressivo em 2003 e 2004, seguido de um declínio gradual até 2012. Entre 2013 e 2015, os valores voltaram a aumentar, alcançando patamares superiores aos registrados antes de 2012. De 2015 a 2019, registrou-se uma queda gradual e, a partir de 2019, houve novamente um crescimento significativo nos valores. De forma geral, a área de estudo acompanha essa trajetória, porém com magnitudes e oscilações menores. Destaca-se, entretanto, um comportamento mais evidente no Oeste baiano do que no bioma: uma tendência de queda mais pronunciada entre 2012 e 2016, seguida de um aumento expressivo entre 2017 e 2022 (Figura 8).

Apesar dos maiores picos de supressão terem ocorrido em 2003 e 2004, a cobertura nativa ainda era mais extensa nesse período do que após 2012 (Mapbiomas, 2024), o que pode ter favorecido maior atividade fotossintética e maior potencial de sequestro de carbono. Após 2012, a supressão persistiu no Oeste baiano, intensificando-se após 2017 e em 2022, resultando em perda contínua de vegetação e redução nos valores do índice de fluxo de CO₂. Esse cenário indica que a conversão da vegetação nativa e a efetividade limitada da legislação têm restringido a capacidade de assimilação de carbono na região (STRASSBURG et al., 2017; ASSIS et al., 2021).

A participação espacial das atividades agrícolas na área de estudo é evidente, normalmente representada por polígonos de forma geométrica regular, associados a áreas de solo exposto, e por formas circulares vinculadas aos pivôs centrais de irrigação (Figuras 1, 3 e 5). Estudos anteriores já demonstraram que áreas convertidas para agricultura ou pastagem perdem grande parte de sua biomassa aérea e subterrânea, o que reduz o estoque de carbono e a eficiência fotossintética do sistema (BUSTAMANTE et al., 2012).

Suela et al. (2024) demonstram que o NCF não impediu a conversão de vegetação nativa no Cerrado, especialmente no MATOPIBA, onde a flexibilização da Reserva Legal favoreceu a expansão agrícola sobre áreas naturais. Esse contexto ajuda a explicar a redução do potencial de sequestro de carbono no oeste baiano após 2012. Enquanto esses autores enfatizam o aumento das emissões de GEE decorrentes da supressão vegetal, os resultados deste estudo evidenciam a dimensão biofísica complementar do processo: a diminuição da atividade fotossintética e da assimilação de CO₂, refletida nos menores valores do índice de fluxo de CO₂ no período pós-2012.

5. CONCLUSÕES

A análise integrada de índices espectrais derivados de séries temporais Landsat (2002–2022) evidenciou diferenças marcantes na dinâmica do fluxo de CO₂ entre as classes de uso e cobertura da terra. As áreas de vegetação natural apresentaram os maiores valores do índice de fluxo de CO₂, mesmo durante a estação seca, indicando maior potencial de sequestro de carbono, enquanto as áreas agrícolas exibiram valores mais baixos e elevada variabilidade interanual, associada ao ciclo produtivo.

A análise comparativa entre os períodos pré- e pós-vigência da Lei nº 12.651/2012 indicou redução significativa no potencial de sequestro de carbono em áreas de vegetação nativa, o que reflete a diminuição da cobertura vegetal e a intensificação da supressão no Oeste da Bahia, sugerindo limitações à efetividade da legislação ambiental. A ausência de tendências temporais significativas ao longo da série reforça a persistência desse cenário.

De forma geral, a integração entre índices espectrais, dados de supressão da vegetação e análises estatísticas mostrou-se uma abordagem eficiente para avaliar a dinâmica do fluxo de CO₂ em áreas com elevada dinâmica de uso e cobertura da terra, fornecendo subsídios relevantes para o planejamento e manejo ambiental no Cerrado.

6. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. A.; PEREZ, L. P.; REIS, M. S.; CAMIOTTI, V. L.; MESSIAS, C. G.; MONTEIRO, E. C.; PINHEIRO, T. F. S.; PINTO, J. F. S. K. C.; SOLER, L. S.; VINHAS, L.; MAURANO, L. E. P.; ADAMI, M.; KUPLICH, T. M.; NARVAES, I. S.; ARCOVERDE, G. F. B.; AMARAL, S. Monitoramento oficial da vegetação nativa brasileira por imagens de satélite: o programa Biombras e os sistemas Prodes, Deter e TerraClass. *Cadernos de Astronomia*, v. 6, n.1, p. 23-38, 2025. <https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47411>
- ASSIS, T. O.; ESCADA, M. I. S.; AMARAL, S. Effects of deforestation over the Cerrado landscape: A study in the Bahia frontier. *Land*, v. 10, e352, 2021. <https://doi.org/10.3390/land10040352>
- BENDINI, H. N.; FONSECA, L. F. G.; SCHWIEDER, M.; KÖRTING, T. S.; RUFIN, P.; SANCHES, I. D. A.; LEITÃO, P. J.; HOSTERT, P. Detailed agricultural land classification in the Brazilian cerrado based on phenological information from dense satellite image time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 82, e101872, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.05.005>
- BOLFE, E. L.; VICTÓRIA, D. C.; CONTINI, E.; BAYMA-SILVA, G.; SPINELLI-ARAÚJO, L.; GOMES, D.

- Matopiba em crescimento agrícola: Aspectos territoriais e socioeconômicos. **Revista de Política Agrícola**, v. 25, n. 4, p. 38-62, 2016.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano CXLIX, n.102, p.1-28, 2012.
- BUSTAMANTE, M. M. C.; NARDOTO, G. B.; PINTO, A. S.; RESENDE, J. C. F.; TAKAHASHI, F.S.C.; VIEIRA, L. C. G. Potential impacts of climate change on biogeochemical functioning of Cerrado ecosystems. **Biotropica**, v. 44, n. 6, p. 684-695, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400005>
- DELLA-SILVA, J. L.; SILVA JUNIOR, C. A.; LIMA, M.; TEODORO, P. E.; NANNI, M. R.; SHIRATSUCHI, L. S.; TEODORO, L. P. R.; CAPRISTO-SILVA, G. F.; BAILO, F. H. R.; OLIVEIRA, G.; OLIVEIRA-JUNIOR, J. F.; ROSSI, F. S. CO₂Flux model assessment and comparison between an airborne hyperspectral sensor and orbital multispectral imagery in Southern Amazonia. **Sustainability**, v. 14, e5458, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14095458>
- FURLANETTO, R. H.; SILVA, C. R. Monitoramento remoto de plantas submetidas à condição de seca. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v. 10, n. 3, p. 115-126, 2017. <https://doi.org/10.5935/PAeT.V10.N3.13>
- GAMON, J. A.; SERRANO, L.; SURFUS, J. S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. **Oecologia**, v. 112, p. 492-501, 1997. <https://doi.org/10.1007/s004420050337>
- GAMON, J. A.; WANG, R.; RUSSO, S. E. Contrasting photoprotective responses of forest trees revealed using PRI light responses sampled with airborne imaging spectrometry. **New Phytologist**, v. 238, p. 1318-1332, 2023. <https://doi.org/10.1111/nph.18754>
- GATTI, L. V.; BASSO, L. S.; MILLER, J. B.; GLOOR, E.; DOMINGUES, L. G.; CASSOL, H. L. G.; TEJADA, G. P.; ARAGÃO, L. E. O. C.; NOBRE, C.; PETERS, W.; MARANI, L.; ARAI, E.; SÁNCHEZ, A. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, v. 595, p. 388-393, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>
- LIU, L.; QU, J.; GAO, F.; MARASENI, T.N.; WANG, S.; ARYAL, S.; ZHANG, Z.; WU, R. Land use carbon emissions or sink: research characteristics, hotspots and future perspectives. **Land**, v. 13, 1-24, 2024. <https://doi.org/10.3390/land13030279>
- LOPES, R. B.; MIOLA, D. T. B. Sequestro de carbono em diferentes fitofisionomias do Cerrado. **SynThesis Revista Digital FAPAM**, v. 2, n. 2, p. 127-143, 2010.
- MAPBIOMAS - Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil. **Collection 9 of the Annual Land Cover and Land Use Maps of Brazil (1985-2023)**. Disponível em: <https://doi.org/10.58053/MapBiomias/XXUKA8>. Acessado em: 04 fev. 2026.
- OLDONI, L. V.; PRUDENTE, V. H. R.; DINIZ, J. M. F. S.; WIEDERKEHR, N. C.; SANCHES, I. D.; GAMA, F. F. Polarimetric Sar Data From Sentinel-1a Applied To Early Crop Classification. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 43, p. 1039-1046, 2020. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1039-2020>
- PAN, Y.; BIRDSEY, R. A.; FANG, J.; HOUGHTON, R.; KAUPPI, P. E.; KURZ, W. A.; PHILLIPS, O. L.; SHVIDENKO, A.; LEWIS, S. L.; CANADELL, J. G.; CIAIS, P.; JACKSON, R. B.; PACALA, S. W.; MCGUIRE, A. D.; PIAO, S.; RAUTIAINEN, A.; SITCH, S.; HAYES, D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, v. 333, n. 6045, p. 988-993, 2011. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- PEREIRA, L. de C.; NUNES, A. B.; ROCHA, I. L.; OLIVEIRA, J. L. de; BRANDÃO, M. L. S. M.; LEITE, L. F. C.; IWATA, B. de F. Fluxo de CO₂ e os índices de vegetação do Parque Nacional das Nascentes do Rio Parnaíba, Piauí, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n.7, p. 3585-3601, 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3585-3601>
- PITTA, F. T.; VEGA, G. C. **Impacts of agribusiness expansion in the Matopiba region: communities and the environment**. Rio de Janeiro: ActionAid Brasil, 2017. 79p.
- RAHMAN, A. F.; GAMON, J. A.; FUENTES, D. A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. In: AVIRIS Workshop. **Proceedings...** JPL/NASA, Pasadena, California, 2000.
- RAZALI, N. M.; WAH, Y. B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. **Journal of Statistical Modeling and Analytics**, v. 2, n. 1, p. 21-33, 2011.
- RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: Sano, S. M.; Almeida, S. P.; Ribeiro, J. F. (Ed.). **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília: EMBRAPA, 2008. p. 152-212.
- ROSSI, F. S.; SANTOS, G. A. A.; MARIA, L. S.; LOURENÇONI, T.; PELISSARI, T. D.; DELLA-SILVA, J. L.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. W.; SILVA, A. de A. e; LIMA, M.; TEODORO, P. E.; TEODORO, L. P. R.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. de; LA SCALA JR, N.; SILVA JR, C. A. da. Carbon dioxide spatial variability and dynamics for contrasting land uses in the central Brazilian agricultural frontier from remote sensing data. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 116, p. 103-809, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103809>
- SANO, E. E.; BETTIOL, G. M.; MARTINS, E. S.; VASCONCELOS, V.; BOLFE, E. L.; VICTORIA, D. C. Características gerais da paisagem do Cerrado. In: BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (Ed.). **Dinâmica agrícola no Cerrado: análises e projeções**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 21-37.
- SIEGEL, S.; CASTELLAN JR., N. J. **Estatística não-paramétrica para ciências do comportamento**. 2 ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 448p.
- SILVA, S. C. P.; BAPTISTA, G. M. M. Modelagens de Sequestro Florestal de Carbono e dos Conteúdos de CO₂ Atmosférico com Dados Hyperion em Diferentes Ambientes na Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n.7, p. 1509-1521, 2019. <https://doi.org/10.14393/rbcv67n7-49195>
- SOARES-FILHO, B.; RAJÃO, R.; MACEDO, M.; CARNEIRO, A.; COSTA, W.; COE, M.; RODRIGUES, H.; ALENCAR, A. Cracking Brazil's Forest Code.

Science, v. 344, n. 6182, p. 363-364, 2014.
<https://doi.org/10.1126/science.1246663>

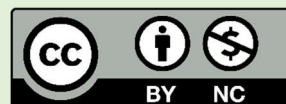
- SOUZA JR. C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; OLIVEIRA, S. W.; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; LENTI, F. E. B.; PATERNOST, F. F.; PAREYN, F. G. C.; SIQUEIRA, J. V.; VIERA, J. L.; FERREIRA NETO, L. C.; SARAIVA, M. M.; SALES, M. H.; SALGADO, M. P. G.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V. V.; AZEVEDO, T. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, e2735, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>
- STRASSBURG, B. B. N.; BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, R.; IRIBARREM, A.; CROUZEILLES, R.; LOYOLA, R.; LATAWIEC, A. E.; OLIVEIRA FILHO, F. J. B.; SCARAMUZZA, C. A. M.; SCARANO, F. R.; SOARES-FILHO, B.; BALMFORD, A. Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, e 09, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0099>
- SUELA, A. G. L.; BOGDEZEVICIUS, C. R.; FONTES, A. T. M.; LIMA, G. J. S.; LIMA, A. dos S. A.; SUELA, G. L.; ALMEIDA, E. R. de. Impactos do novo código florestal no bioma Cerrado: foco no MATOPIBA. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 9, p. 1-21, 2024. <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n9-266>
- TEOBALDO, D.; BAPTISTA, G. D. M. Quantificação da severidade das queimadas e da perda de sequestro florestal de carbono em unidades de conservação do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 1, p. 250-264, 2016. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.1.p250-264>
- THEN, Y. J.; HALIM, S. A. Modified Mann-Kendall with higher-order statistics for trend analysis. **Scientific Reports**, v. 16, e500, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30034-0>
- ZHANG, C.; FILELLA, I.; LIU, D.; OGAYA, R.; LLUSIÀ, J.; ASENSIO, D.; PEÑUELAS, J. Photochemical Reflectance Index (PRI) for Detecting Responses of Ecosystem Carbon Fluxes to Climate Variability and Extremes Across Time Scales. **Remote Sensing**, v. 9, n. 8, e839, 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9111189>

Agradecimentos: Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico (CNPq) - processo 422354/2023-6 (Monitoramento e avisos de mudanças de cobertura da terra nos Biomas Brasileiros – capacitação e semiautomação do programa BiomasBR), sediado e executado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os autores agradecem aos revisores pelas valiosas contribuições e sugestões na versão anterior do manuscrito.

Contribuições dos autores: P.C.S.A.: conceitualização, metodologia, investigação ou coleta de dados, redação (original), redação (revisão e edição); F.C.A.: conceitualização, metodologia, redação (original), redação (revisão e edição); E.B.M.M.: metodologia, redação (revisão e edição); S.M.A.C.F.: metodologia, redação (revisão e edição); C.G.M.: metodologia, redação (revisão e edição). Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Disponibilidade de dados: O conjunto de dados está disponível mediante solicitação aos autores correspondentes.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflito de interesses.



Copyright: © 2026 by the authors. This article is an Open-Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons **Attribution-NonCommercial (CC BY-NC)** license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).