DINÂMICA PRÉ E PÓS-DISTÚRBIO DA VEGETAÇÃO POR INTEGRAÇÃO ÓPTICA E SAR

Autores: Ricardo Jair de Oliveira[1], Vinicius de Souza Monteiro[1], Irislene da Silva Lima[1], Andreyla Barbosa da Cunha[1], Mauricio Borges do Nascimento[1], Alisson da Silva Nogueira[1], Wender Henrique Batista da Silva[2].

[1]Universidade Federal do Espírito Santo - Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Avenida Governador Lindenberg, 316, Centro - 29.550-000 - Jerônimo Monteiro - ES, Brasil, ricardo.jair@hotmail.com, viniciusmonteiro.15@hotmail.com, irislenelimaef@gmail.com, andreyla.bcunha@gmail.com, mauriciobn98@gmail.com, alisson.nogueira@edu.ufes.br.
[2]Universidade Federal de Lavras - Programa de Pós-Graduação em Entomologia, Trevo rotatória Prof. Edmir de Sá Santos, CEP 37203-202, Brasil, wender45hotmail@gmail.com

Resumo

A análise conjunta de dados ópticos e de radar de abertura sintética (SAR) pode contribuir para o monitoramento da vegetação. Este estudo analisou as relações entre o NBR, derivado do Sentinel-2, e as polarizações VV e VH e os índices RATIO e RVI do Sentinel-1, nos períodos pré e pós-queimada na Estação Ecológica de Taiamã, no Pantanal. As associações foram avaliadas pela correlação de Spearman, separadamente para cada período. No pré-queimada, VV e VH apresentaram correlações positivas com o NBR (ρ = 0,65 e 0,45, respectivamente). No pós-queimada, os coeficientes foram maiores, atingindo 0,92 para VV e 0,84 para VH. RATIO e RVI apresentaram correlações negativas no pré-queimada (ρ ≈ −0,52) e positivas e fracas no pós-queimada (ρ = 0,27 e 0,28). Os resultados indicam diferenças nas associações entre as respostas óptica e SAR, com maior correspondência entre NBR, VV e VH após a queimada. A análise conjunta desses dados apresenta potencial para caracterizar as condições da vegetação, considerando a influência da sazonalidade e do regime hidrológico.

Palavras-chave: Pantanal. Incêndios florestais. Sensoriamento remoto. Radar de abertura sintética.

Área do Conhecimento: Ciências Agrárias: Engenharia Florestal.

Introdução

A vegetação desempenha um papel fundamental na regulação dos ciclos biogeoquímicos, na manutenção da biodiversidade e no equilíbrio climático global. No entanto, ecossistemas vegetais estão constantemente sujeitos a distúrbios naturais e antrópicos, como queimadas, desmatamento e ataques bióticos, que promovem alterações significativas na estrutura e no funcionamento dos sistemas ecológicos. A compreensão da magnitude e da dinâmica desses distúrbios é essencial para o monitoramento ambiental e a tomada de decisões no manejo de recursos naturais.

Nesse contexto, o sensoriamento remoto tem se consolidado como uma ferramenta indispensável para a detecção e análise de mudanças na vegetação em diferentes escalas espaciais e temporais (Souza *et al.*, 2014; Silva-junior *et al.*, 2018; Velasque *et al.*, 2018). Índices espectrais derivados de sensores ópticos, como o *Normalized Burn Ratio* (*NBR*), são amplamente utilizados para avaliar a severidade de distúrbios, devido à sua sensibilidade à biomassa e ao conteúdo de água da vegetação (Key; Benson, 1999; Smith et al., 2007). Entretanto, dados ópticos apresentam limitações importantes, especialmente em regiões tropicais, onde a cobertura de nuvens pode comprometer a aquisição de imagens consistentes (Sano *et al.*, 2007).

Por outro lado, os dados *SAR* (*Synthetic Aperture Radar*) podem ser considerados um elemento importante neste tipo de análise, independente das condições de cobertura de nuvens presente na área, buscando dessa forma, sanar a lacuna da análise multitemporal de sensores ópticos (Dusseux *et al.*, 2014). O modo *dual-polarização Sentinel-1* (*VV-VH*), refere-se à transmissão de uma onda polarizada verticalmente com recepção simultânea de polarização vertical e horizontal. Consequentemente, a onda recebida em canais polarizados cruzados (*VV-VH*) fornece informações sobre um alvo em termos de intensidades de retroespalhamento (ESA, 2018). O retroespalhamento

SAR, particularmente nas polarizações *VV* e *VH*, está diretamente relacionado à geometria do dossel, à rugosidade superficial e à umidade da vegetação (Van Tricht *et al.*, 2018; Arias *et al.*, 2020; Mandal *et al.*, 2020). Dessa forma, o uso combinado de dados ópticos e radar tem sido apontado como uma abordagem promissora para melhorar a detecção e interpretação de mudanças ambientais.

Apesar dos avanços recentes, ainda existe uma lacuna na compreensão integrada entre respostas espectrais e estruturais da vegetação, especialmente no que se refere à forma como essas variáveis se reorganizam após eventos de distúrbio. Estudos frequentemente analisam dados ópticos e *SAR* de forma isolada, limitando a capacidade de interpretar processos ecológicos complexos, como a degradação estrutural do dossel e a perda de biomassa.

Diante desse cenário, a integração multissensor surge como uma estratégia essencial para capturar de forma mais abrangente as alterações na vegetação, permitindo não apenas detectar mudanças, mas também compreender os mecanismos subjacentes aos distúrbios. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo analisar as relações entre o índice NBR, derivado do Sentinel-2, e as variáveis SAR do Sentinel-1 nos períodos pré e pós-queimada na Estação Ecológica de Taiamã.

Metodologia

A área de estudo corresponde à Estação Ecológica de Taiamã (ESEC Taiamã), uma unidade de conservação federal localizada no estado de Mato Grosso, Brasil, inserida no bioma Pantanal.

A unidade está localizada no rio Paraguai, no município de Cáceres, estado de Mato Grosso, com coordenadas médias W 57°30° e S 16°51° na região norte do Pantanal, criada com uma área de aproximadamente 11.554 hectares, sendo influenciada diretamente pelo regime hidrológico do rio Paraguai. A região apresenta forte sazonalidade, com períodos de cheia e seca que condicionam a distribuição da vegetação e a dinâmica da paisagem.

Foram utilizados dados multissensores provenientes dos satélites *Sentinel-2* (óptico) e *Sentinel-1* (radar), ambos disponibilizados pela Agência Espacial Europeia (*ESA*) com 10 metros de resolução espacial e adquiridos por meio da plataforma *Google Earth Engine* (*GEE*).

As imagens ópticas foram filtradas por cobertura de nuvens inferior a 20% e organizadas conforme os períodos de análise. Foram utilizadas as bandas B2, B3, B4, B8, B11 e B12, com composição por mediana.

Os dados *SAR*, nas polarizações *VV* e *VH*, foram convertidos para escala linear e submetidos a filtragem espacial para redução de ruído *speckle*.

Foram definidos três períodos para análise temporal:

- Pré-distúrbio (pré-queimada): 01/03/2020 a 30/05/2020
- Pós-distúrbio (pós-queimada): 30/10/2020 a 30/12/2020
- Referência (*NDWI*): 28/02/2020 a 30/05/2020

As imagens foram compostas por mediana. O período de referência foi utilizado para garantir maior estabilidade na identificação de corpos hídricos. Para evitar interferências de superfícies aquáticas, foi calculado o índice *NDWI* (*Normalized Difference Water Index*):
NDWI = (*Green - NIR*) / (*Green + NIR*)

A partir dos dados ópticos, foi calculado o índice NBR (Normalized Burn Ratio). Para os dados SAR, foram analisadas as polarizações VV e VH e calculados os índices derivados RATIO (VH/VV) e RVI, nos períodos pré e pós-queimada.

Procedimentos similares foram aplicados aos demais índices para fins comparativos. O produto final foi exportado para o *Google Drive* com resolução espacial de 10 metros, utilizando a área de estudo como região de recorte e limite máximo de pixels de $1x10^{13}$.

A análise estatística compreendeu a avaliação das relações entre o NBR e as variáveis SAR por meio do coeficiente de correlação de *Spearman* e de gráficos de dispersão, separadamente para os períodos pré e pós-queimada.

Foram gerados 218 pontos amostrais distribuídos em grade regular sobre a área da Estação Ecológica de Taiamã, com espaçamento de 550 metros entre os pontos, utilizando a ferramenta 'Criar grade' do *software QGIS* (*QGIS 3.40 Bratislava*). Os pontos foram restritos aos limites da UC utilizando a ferramenta de recorte vetorial. Para cada ponto amostral, foi delimitado um buffer circular de 100 m

de raio. Em cada buffer, foram extraídos os valores médios dos índices espectrais e das variáveis SAR por meio da ferramenta Estatísticas Zonais do QGIS.

A análise estatística foi realizada no *software R* (versão 4.3.2). Inicialmente, a normalidade das variáveis foi verificada pelo teste de *Lilliefors*, que indicou distribuição não normal para todas as variáveis analisadas ($p < 0,05$), justificando o uso do coeficiente de correlação de *Spearman* (ρ) para todas as análises.

O *Normalized Burn Ratio* (*NBR*) foi adotado como variável espectral de referência para avaliar sua associação com as polarizações VV e VH e com os índices RATIO e RVI, separadamente nos períodos pré e pós-queimada, por ser o índice espectral mais consolidado na literatura para essa finalidade. Os resultados foram considerados estatisticamente significativos quando $p < 0,05$.

Resultados

A integração entre dados ópticos (*Sentinel-2*) e radar (*Sentinel-1*) revelou padrões claros de mudança na estrutura e no vigor da vegetação entre os períodos pré e pós-evento, com destaque para a relação entre o *NBR* e as variáveis *SAR*.

No período pré-evento, observou-se correlação positiva moderada entre *VH* e *NBR* ($\rho = 0,45$; $p < 0,001$) e mais forte entre *VV* e *NBR* ($\rho = 0,65$; $p < 0,001$), indicando que áreas com maior biomassa apresentam maior integridade espectral, com maior sensibilidade do canal *VV* à estrutura da vegetação.

No período pós-queimada, os coeficientes de correlação de VV e VH com o NBR foram maiores que os observados no período pré-queimada, (*VV vs NBR*: $\rho = 0,92$; *VH vs NBR*: $\rho = 0,84$) conforme pode ser observado na Figura 1, evidenciando forte associação entre estrutura física da vegetação e resposta espectral. Esse padrão indica que, após o distúrbio, a redução do *NBR* acompanha diretamente a diminuição do retroespalhamento, refletindo perda de biomassa e alterações estruturais.

Os índices *SAR* derivados também mudaram de comportamento. No pré-evento, *RATIO* e *RVI* apresentaram correlação negativa com o *NBR* ($\rho = -0,52$), sugerindo relações estruturais complexas do dossel que não se traduzem linearmente no índice espectral. No pós-evento, essas correlações tornam-se positivas (*RATIO:* $\rho = 0,27$; *RVI:* $\rho = 0,28$), ainda que fracas, indicando resposta direta à degradação, conforme pode ser observado na Figura 2.

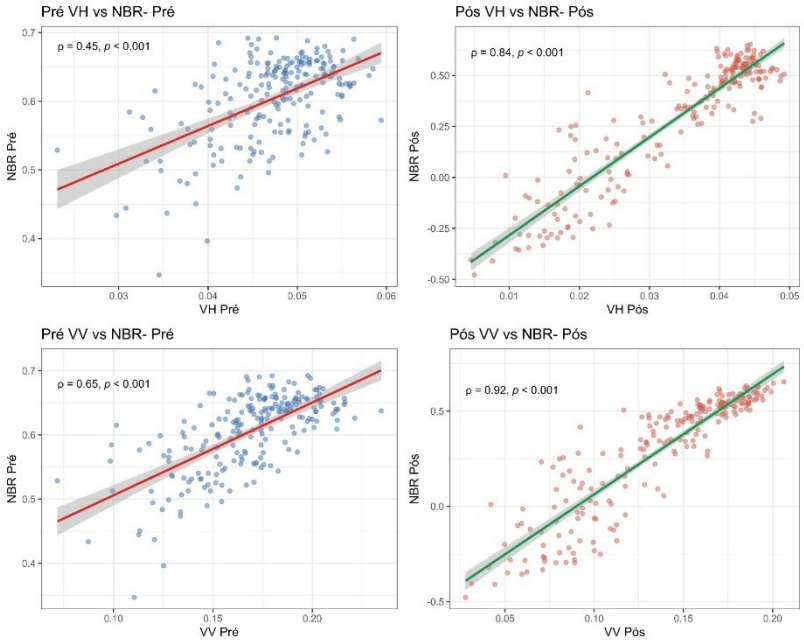
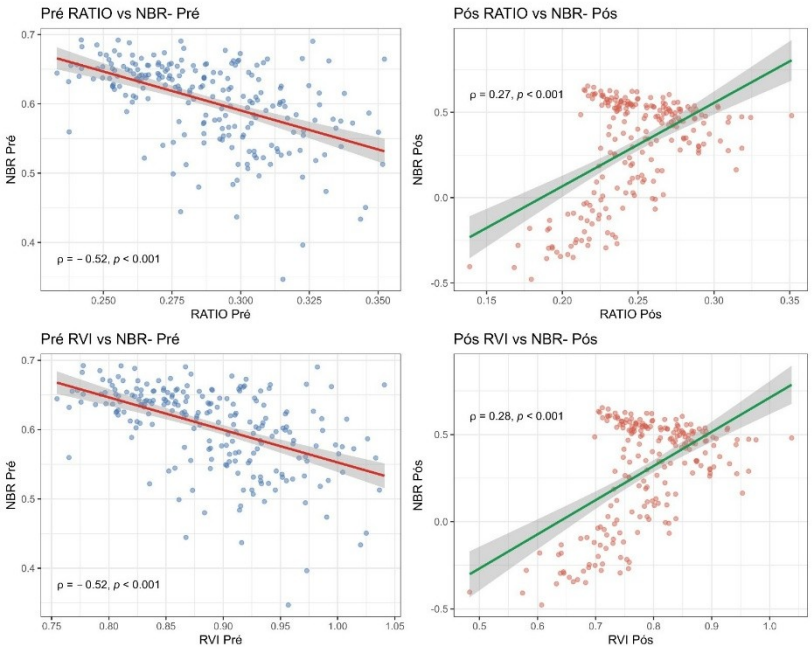


Figura 1 – Relação entre o índice NBR e as polarizações VH e VV do Sentinel-1 nos períodos pré e pós-queimada na ESEC Taiamã. Os pontos azuis representam o período pré-queimada, e os vermelhos, o pós-queimada. As linhas representam os ajustes de regressão, e as áreas sombreadas correspondem aos intervalos de confiança. Os valores de ρ representam o coeficiente de correlação de Spearman, e os valores de p correspondem aos testes de significância das correlações.



.

Figura 2 – Relação entre o índice NBR e os índices RATIO (VH/VV) e RVI derivados do Sentinel-1 nos períodos pré e pós-queimada na ESEC Taiamã. Os pontos azuis representam o período pré-queimada, e os vermelhos, o pós-queimada. As linhas representam os ajustes de regressão, e as áreas sombreadas correspondem aos intervalos de confiança. Os valores de ρ representam o coeficiente de correlação de Spearman, e os valores de p correspondem aos testes de significância das correlações.

Discussão

Os resultados indicam que a análise conjunta de dados ópticos e SAR contribui para caracterizar as condições da vegetação nos períodos pré e pós-queimada. Enquanto o NBR representa a resposta espectral da vegetação, o Sentinel-1 fornece informações de retroespalhamento associadas às características físicas e à umidade dos alvos. O potencial dessa complementaridade é discutido por Hirschmugl *et al.* (2020) e Tang *et al.* (2023) que encontraram melhor desempenho na detecção de distúrbios florestais quando dados ópticos e *SAR* foram combinados.

No período pós-queimada, as correlações positivas entre o NBR e o retroespalhamento em VV (ρ = 0,92) e VH (ρ = 0,84) mostram que menores valores de NBR estiveram associados a menores valores de retroespalhamento nas unidades amostrais. A associação mais forte com VV indica maior correspondência dessa polarização com o NBR nas condições analisadas. Entretanto, essas correlações, isoladamente, não permitem quantificar a perda de biomassa ou atribuir as diferenças observadas exclusivamente à queimada.

As correlações de RATIO e RVI com o NBR passaram de negativas no período pré-queimada (ρ ≈ −0,52) para positivas e fracas no período pós-queimada (ρ = 0,27 para RATIO e ρ = 0,28 para RVI). Essa inversão indica que a relação entre os índices SAR e a resposta espectral da vegetação diferiu entre os períodos. O comportamento pode estar associado a alterações na cobertura, na estrutura e na umidade dos alvos, que influenciam a resposta relativa de VV e VH. Contudo, a magnitude das correlações pós-queimada limita a interpretação de RATIO e RVI como indicadores isolados das condições da vegetação.

As correlações observadas entre o NBR e as polarizações VV e VH indicam associação entre as respostas óptica e SAR, especialmente no período pós-queimada. Esses resultados sugerem o potencial do uso conjunto desses dados para caracterizar as condições da vegetação nos períodos analisados. Em conjunto, esses resultados indicam que a integração entre informações espectrais e *SAR* fornece uma caracterização mais completa do distúrbio, combinando alterações na condição da vegetação com mudanças em sua resposta estrutural. Essa abordagem é consistente com os resultados de Hirschmugl *et al.* (2020) e Tang *et al.* (2023) sobre o uso combinado de sensores ópticos e *SAR* no monitoramento de distúrbios florestais.

Apesar disso, a literatura também aponta limitações do uso isolado do radar. Ferla, Kuplich e Narvaes (2025) observaram menor acurácia na classificação do uso e cobertura da terra com variáveis SAR isoladas em comparação à sua combinação com dados ópticos. Embora essa aplicação seja distinta da análise de correlação realizada neste estudo, ela reforça o potencial de abordagens multissensores, como a fusão de dados *Sentinel-1* e *Sentinel-2* e a incorporação de informações de textura multiespectral, que podem ampliar a capacidade de identificar alterações mais sutis na estrutura e na condição da vegetação.

Conclusão

A integração entre dados ópticos e *SAR* apresenta potencial para aprimorar a caracterização das alterações na vegetação, permitindo analisar conjuntamente aspectos espectrais e estruturais. A combinação dessas informações contribui para uma interpretação mais ampla dos efeitos provocados por distúrbios na cobertura vegetal.

As mudanças observadas entre os períodos pré e pós-evento indicam que a resposta do radar está relacionada às alterações na cobertura e na estrutura da vegetação. Nesse contexto, os índices derivados do *Sentinel-1* podem complementar as informações obtidas pelos índices espectrais, contribuindo para uma melhor compreensão da intensidade e da distribuição das alterações.

De modo geral, a abordagem multissensor se mostra uma alternativa promissora para o monitoramento da vegetação, especialmente em situações nas quais diferentes fontes de informação são necessárias para caracterizar a extensão e a intensidade dos distúrbios. Essa abordagem também pode ser aplicada a diferentes processos de alteração da cobertura vegetal, ampliando as possibilidades de uso do sensoriamento remoto no monitoramento ambiental.

Referências

ARIAS, M.; CAMPO-BESCÓS, M. Á.; ÁLVAREZ-MOZOS, J. Crop Classification Based 10 on Temporal Signatures of Sentinel-1 Observations over Navarre Province, Spain. **Remote Sensing**, v. 12, n. 2, 2020. doi: https://doi.org/10.3390/rs12020278

DUSSEUX, P.; CORPETTI, T.; HUBERT-MOY, L.; CORGNE, S. Combined use of multi-temporal optical and radar satellite images for grassland monitoring. **Remote Sensing**, v. 6, n. 23 7, p. 6163-6182, 2014. doi: https://doi.org/10.3390/rs6076163

EUROPEAN SPACE AGENCY. Sentinel-1 SAR technical guide. 2018 Disponível em: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar. Acesso em: 01 jun. 2026.

FERLA, A. K.; KUPLICH, T. M.; NARVAES, I. S. Utilização do classificador Random Forest para classificação do uso e cobertura da terra a partir de dados Sentinel-1 e Sentinel-2 em região campestre no bioma Mata Atlântica. **Geografia: Ensino & Pesquisa**, v. 29, e87967, 2025.

HIRSCHMUGL, M.; DEUTSCHER, J.; SOBE, C.; BOUVET, A.; MERMOZ, S.; SCHARDT, M. Use of SAR and optical time series for tropical forest disturbance mapping. **Remote Sensing**, v. 12, n. 4, p. 727, 2020. https://doi.org/10.3390/rs12040727

KEY, C. H.; BENSON, N.C. The Normalized Burn Ratio (NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity. **United States Geological Survey, Northern Rocky Mountain Science Center: Bozeman**, MT, USA, 1999.

MANDAL, D. et al. Dual polarimetric Radar Vegetation Index for crop growth monitoring using Sentinel-1 SAR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 247, 111954, 2020.

SANO, E. E.; FERREIRA, L. G.; ASNER, G. P.; STEINKE, E. T. Spatial and temporal probabilities of obtaining cloud-free Landsat images over the Brazilian tropical savanna. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 12, p. 2739–2752, 2007.

SILVA JUNIOR, C. H.; ANDERSON, L.; ARAGÃO, L. E.; RODRIGUES, B. Dinâmica das queimadas no Cerrado do Estado do Maranhão, Nordeste do Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 35, p. 1-14, 2018.

SMITH, A. M. S.; DRAKE, N.A.; WOOSTER, M.J.; HUDAK A. T.; HOLDEN, Z. A.; GIBBONS, C.J. Production of Landsat ETM+ Reference Imagery of Burned Areas within Southern African Savannahs: Comparison of Methods and Application to MODIS. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 12. p. 2753-2775. 2007.

SOUZA, M. C.; BIUDES, M. S.; DANELICHEN, V. H. M.; MACHADO, N. G.; MUSIS, C. R.; VOURLITIS, G. L.; NOGUEIRA, J. S. Estimation of gross primary production of the Amazon-Cerrado transitional forest by remote sensing techniques. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 1, p. 01-12, 2014.

TANG, X.; BRATLEY, K. H.; CHO, K.; BULLOCK, E. L.; OLOFSSON, P.; & WOODCOCK, C. E. Near real-time monitoring of tropical forest disturbance by fusion of Landsat, Sentinel-2, and Sentinel-1 data. **Remote Sensing of Environment**, v. 294, p. 113626, 2023. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113626

VAN TRICHT, K. et al. Synergistic Use of Radar Sentinel-1 and Optical Sentinel-2 Imagery for Crop Mapping: A Case Study for Belgium. **Remote Sensing**, v. 10, n. 10, 2018.

VELASQUE, M. C. S.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; DANELICHEN, V. H. M.; VOURLITIS, G. L.; NOGUEIRA, J. S. Modelling Gross Primary Production of Tropical Forest by Remote Sensing. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018.