DEFASAGEM TEMPORAL ENTRE PRECIPITAÇÃO E RESPOSTA DA VEGETAÇÃO EM UM BACIA HIDROGRÁFICA DO SEMIÁRIDO DO BRASIL

Antonio Marcos Nunes dos Santos[1]; Maria Cecilia Silva Souza[2]; Alaine de Sousa Pereira[3]; Luís Henrique Aprígio Silva[4]; Jennifer Marinho do Nascimento Fernandes[5]; Celso Augusto Guimarães Santos[6] & Richarde Marques da Silva[7]

RESUMO – O presente artigo investigou a influência da precipitação na cobertura vegetal em uma típica bacia hidrográfica no bioma Caatinga. O estudo foi aplicado na bacia hidrográfica do Alto Rio Paraíba, localizada na região semiárida paraibana. Neste estudo, a influência da precipitação na cobertura vegetal foi analisada com base na defasagem temporal (*lag*) entre a precipitação e o NDVI, por meio de análise de correlação cruzada com *lags* de 0 a 120 dias em escala diária. Para isso, foram utilizados produtos MODIS MOD13Q1 e CHIRPS, para o período entre 2001 e 2025 (totalizando 575 composições temporais). Para analisar o *lag* foram calculadas as correlações das anomalias entre a precipitação média mensal e o NDVI para uma área experimental, usando a correlação de Pearson (r) e de Spearman (r_s). Todo o processamento dos dados foi realizado na plataforma Google Earth Engine (GEE) através da interface rgee no ambiente RStudio. Os resultados apontaram que a precipitação acumulada nos 73 dias anteriores à imagem MODIS apresentou a maior correlação entre o NDVI e a precipitação (r = 0,713; r_s = 0,722). Após a remoção da sazonalidade, a correlação das anomalias foi de r = 0,52, confirmando sensibilidade da vegetação à variabilidade hídrica interanual. Os resultados contribuem para o monitoramento da vegetação na região Semiárida e a avaliação dos impactos de eventos extremos na vegetação no bioma Caatinga.

ABSTRACT – This study investigated the influence of precipitation on vegetation cover in a typical watershed within the Caatinga biome. The research was conducted in the Upper Paraíba River Basin, located in the semiarid region of Paraíba State, northeastern Brazil. The influence of precipitation on vegetation cover was analyzed based on the temporal lag between rainfall and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), using cross-correlation analysis with lags ranging from 0 to 120 days at a daily time scale. MODIS MOD13Q1 and CHIRPS products were used for the period from 2001 to 2025, totaling 575 temporal composites. To evaluate the lag effect, correlations between precipitation and NDVI anomalies were calculated for an experimental area using Pearson's correlation coefficient (r) and Spearman's rank correlation coefficient (rs). All data processing was performed on the Google Earth Engine (GEE) platform through the rgee interface in the RStudio environment. The results showed that accumulated precipitation over the 73 days preceding the MODIS image exhibited the highest correlation between NDVI and rainfall (r = 0.713; rs = 0.722). After removing seasonality, the anomaly correlation remained significant (r = 0.52), confirming the sensitivity of vegetation to interannual hydrological variability. These findings contribute to vegetation monitoring in semiarid regions and support the assessment of the impacts of extreme events on vegetation dynamics within the Caatinga biome.

Palavras-Chave – Caatinga; Defasagem temporal; Semiárido.

[1]) Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, CT, João Pessoa – PB, antonio.nunes@academico.ufpb.br
[2]) Universidade Federal da Paraíba, Pós-Doutoranda pelo PRODEMA, CCEN, João Pessoa – PB, ceciliasilvalegat@gmail.com
[3]) Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, CT, João Pessoa – PB, alainejosefa.45@gmail.com
[4]) Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, CT, João Pessoa – PB, luis.henrique.aprigio.silva@academico.ufpb.br
[5]) Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-graduação em Geografia, CCEN, João Pessoa – PB, profjennifer.geo@gmail.com
[6]) Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, CT, João Pessoa – PB, celso@ct.ufpb.br
[7]) Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Geociências, CCEN, João Pessoa – PB, richarde@geociencias.ufpb.br

INTRODUÇÃO

A vegetação do semiárido brasileiro representa um dos sistemas mais sensíveis à variabilidade da precipitação e é pouco estudada (Pereira da Silva et al., 2026). A caatinga por sua vez, é um bioma exclusivo do Brasil e está submetida a um regime pluviométrico marcadamente irregular, com períodos de escassez hídrica prolongada e eventos de precipitação extrema e concentrada (Lima et al., 2026). A precipitação é um dos principais fatores que influenciam na dinâmica da vegetação e determina fatores importantes do ciclo vegetativo (Barbosa et al., 2016). A influência da precipitação na vegetação vem sendo discutida atualmente, para buscar maneiras mais eficientes de prever o comportamento desse Bioma as mudanças climáticas atuais (Shalwee et al., 2025; Silva et al., 2023).

Nesse sentido, compreender a defasagem temporal (*lag*) entre eventos pluviométricos e a resposta da vegetação é uma maneira eficiente para monitorar a influência do volume de chuva no vigor da vegetação no bioma Caatinga, uma vez que a defasagem temporal entre o evento pluviométrico e a resposta fotossintética da vegetação reflete os processos de absorção de água pelo solo, recarga do lençol freático e mobilização de reservas hídricas pelas plantas (Liu et al., 2024).

Atualmente, diversos estudos sobre a análise a relação da água com a cobertura vegetal na Caatinga vêm sendo aplicados (Jardim et al., 2022; Patriota et al., 2026). Produtos orbitais do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) do sensor MODIS e os dados de precipitação do produto Climate Hazards InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS) permitem acompanhar a dinâmica ambiental em escala regional, com séries históricas longas e cobertura espacial densa (Didan, 2015; Funk et al., 2015). A disponibilidade desses dados em resolução diária constitui um diferencial analítico relevante, pois eventos pluviométricos intensos e de curta duração podem ser mascarados em composições de 16 dias do NDVI, comprometendo a identificação precisa do lag entre precipitação e resposta vegetativa.

Para compreender essa aplicação no bioma da caatinga optou-se por escolher uma bacia típica do bioma Caatinga, que possui clima e vegetação de recorrente presença de estresse hídrico, com precipitação variando de 400 a 800 mm/ano, evapotranspiração que pode chegar a mais de 2000 mm/ano, levando a grandes déficits hídricos (de Medeiros et al., 2019; Da Silva et al., 2020). Esse desequilíbrio entre a oferta e a demanda hídrica faz da bacia um ambiente propício para o estudo da sensibilidade da vegetação às flutuações pluviométricas, tornando-se um cenário recomentado para a aplicação do estudo. Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo investigar a influência da precipitação na cobertura vegetal em uma típica bacia hidrográfica no bioma Caatinga utilizando dados de sensoriamento remoto e linguagem R.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

A bacia hidrográfica do Alto Rio Paraíba está localizada na região semiárida do Estado da Paraíba, Nordeste do Brasil (Figura 1), sendo um dos principais cursos d'água do estado. De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, o clima na região é do tipo BSh (semiárido quente), caracterizado por elevada irregularidade pluviométrica espacial e temporal (Alvares et al., 2013).

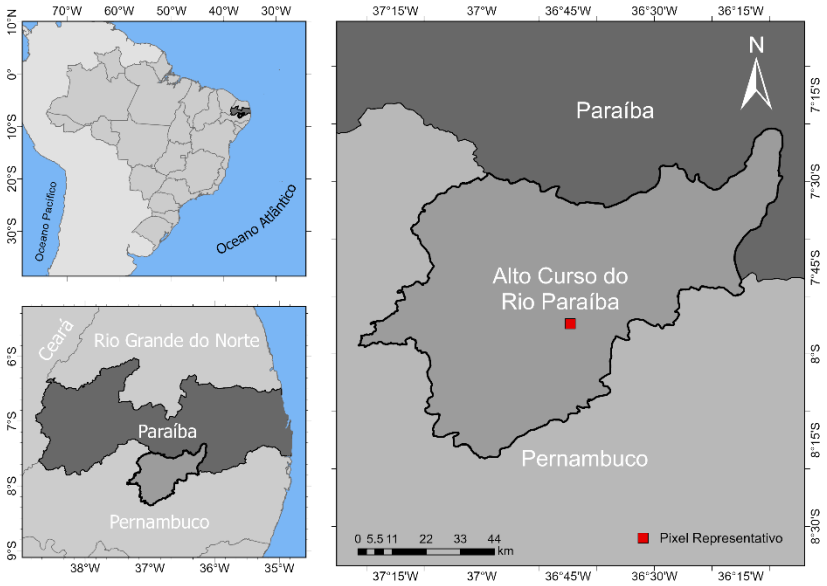


Figura 1: Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Alto Paraíba, localizando na américa do sul, brasil e no estado da Paraíba fazendo divisa com o estado do Pernambuco.

Dados Utilizados e plataforma de processamento

Os dados pluviométricos foram obtidos do CHIRPS, com resolução espacial de 0,05° (5,5 km) e resolução temporal diária (Funk et al., 2015). Os dados de NDVI foram obtidos do produto MODIS MOD13Q1 (Collection 6.1), com resolução espacial de 250 metros e temporal de 16 dias (Didan, 2015). O período analisado foi de 2001 a 2025, totalizando aproximadamente 575 composições temporal.

Todo o processamento dos dados foi realizado na plataforma Google Earth Engine (GEE) através da interface rgee no ambiente RStudio (Aybar et al., 2020; Gorelick et al., 2017). O processamento das séries temporais, a construção das variáveis de defasagem e as análises de correlação foram conduzidos em linguagem de programação em R (The RCore Team, 2026), com uso dos pacotes *data.table (Barrett et al., 2026)* para manipulação eficiente de dados e *ggplot2* (Wickham et al., 2026) para visualização.

Seleção da área representativa

A seleção da área representativa foi conduzida em escala de pixel único para cada ano de 2001 a 2025, selecionados objetivamente dentre todos os pixels da bacia exportados do GEE. A área representativa usada neste estudo está localizada entre as coordenadas 7°54′43″ S e 7°54′51″ S de latitude, e 36°44′36″ O e 36°44′44″ O de longitude. Neste estudo aplicou-se um filtro de qualidade retendo apenas pixels com no máximo 20% de dados ausentes e NDVI mediano ≥ 0,10. Para cada pixel aprovado, calculou-se a anomalia do NDVI em relação à sua climatologia mensal e, em seguida, construiu-se uma série de referência da bacia como a média dessas anomalias em cada data. Os pixels selecionados foram aqueles com maior correlação de Pearson com essa série de referência, garantindo que a análises subsequentes representassem o comportamento vegetativo médio da bacia e não uma resposta local isolada.

Construção das variáveis de defasagem

Para cada composição MODIS disponível, foram calculadas duas variáveis de precipitação para cada defasagem (L) variando de 0 a 120 dias, sendo 0 o dia de registro do NDVI, com passo diário: (a) precipitação acumulada (pacc_L): soma da precipitação diária CHIRPS nos L dias imediatamente anteriores à data da imagem MODIS, inclusive o dia correspondente, que representa a disponibilidade hídrica acumulada no período antecedente à imagem; (b) precipitação do dia exato (pdia_L): precipitação registrada no dia L anterior a composição MODIS, que representa a chuva pontual em cada defasagem específica. O cálculo foi realizado a partir da soma cumulativa da série diária de precipitação, com indexação temporal por busca binária, garantindo eficiência computacional para séries com mais de duas décadas de dados diários.

Análise estatística

A relação entre a precipitação e o NDVI foi avaliada através do coeficiente de correlação de Pearson (r) e Spearman (r_s) para cada *lag* temporal, comparando as métricas de precipitação acumulada e diária. Para cada tipo de precipitação (acumulada e diária), identificou-se o *lag* com maior correlação com NDVI. O *lag* ótimo foi definido como o valor de L associado ao maior valor absoluto de r, identificado separadamente para precipitação acumulada e precipitação diária. Adicionalmente, a correlação mensal entre o NDVI e a precipitação acumulada no lag ótimo foi calculada para cada mês do ano, permitindo identificar a sazonalidade da resposta vegetativa.

Remoção da sazonalidade

Para eliminar o efeito sazonal ao ciclo anual da vegetação, as anomalias mensais tanto do NDVI quanto do Lag Otimo foram calculadas subtraindo-se a média mensal de longo prazo (2001-2025) de cada observação individual. Esse método garante que a precipitação seja avaliada como um desvio (déficit ou excesso hídrico) em relação ao volume integrado esperado para o periodo, permitindo quantificar a resposta real da vegetação à variabilidade na disponibilidade hídrica. As anomalias mensais foram então isoladas por meio da subtração da respectiva média climatológica do valor bruto observado, seguindo a Equação 1:

$$X'_i = X_i - \overline{X}_{(i)} \quad (1)$$

Onde: X_i representa o valor observado da variável (NDVI ou lag ótimo) na composição i, $\overline{X}_{(i)}$ é a média histórica de longo prazo para o mês correspondente àquela composição e do *lag* para o período, e X'_i é a anomalia resultante das variáveis ambientais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O NDVI apresenta mudança de acordo com a mudança espacial e temporal e do clima. A Figura 2 mostra a diferença do NDVI ao longo do período de estudo, assim como área considerada representativo para toda a bacia. Deve-se destacar que há uma grande variação da vegetação ao longo dos anos, típico do bioma Caatinga, como reportado na literatura (Salvador; Porto de Lima, 2022; Pereira Justino et al., 2025). O que pode ser observado é que além do processo de degradação ambiental sofrido pela vegetação, e pelas mudanças climáticas, existe a resposta da vegetação a precipitação. A Figura 3 mostra como a serie temporal da precipitação e do NDVI em relação aos pixels representativos acompanham o comportamento da chuva ao longo do período estudado.

Os resultados mostram a sensibilidade que a vegetação tem em resposta a chuva o que já é esperado, quando maior o volume de chove ou menor o valor do NDVI tende a acompanhar. As Figuras 3a e 3b mostram a precipitação diária e mensal e o NDVI (16 dias) e como o volume acumulado influencia na resposta do NDVI. Os resultados obtidos mostram que houve uma diminuição do vigor da vegetação devido a seca severa entre 2012 e 2018, período no qual houve uma das mais severas secas registradas no Brasil, confirmando a hipótese da resposta da vegetação a chuva (Marengo et al., 2020; Santos; Latrubesse, 2021).

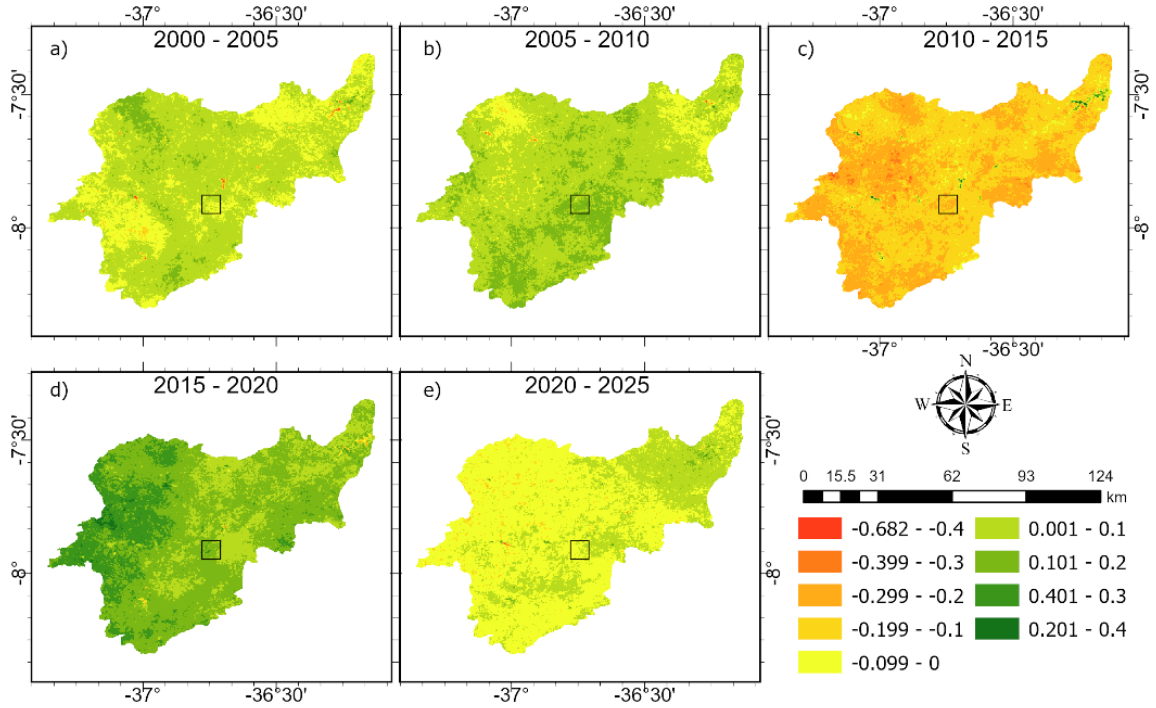


Figura 2: Diferença de NDVI na bacia hidrográfica do Alto Rio Paraíba com intervalo quinquenal.

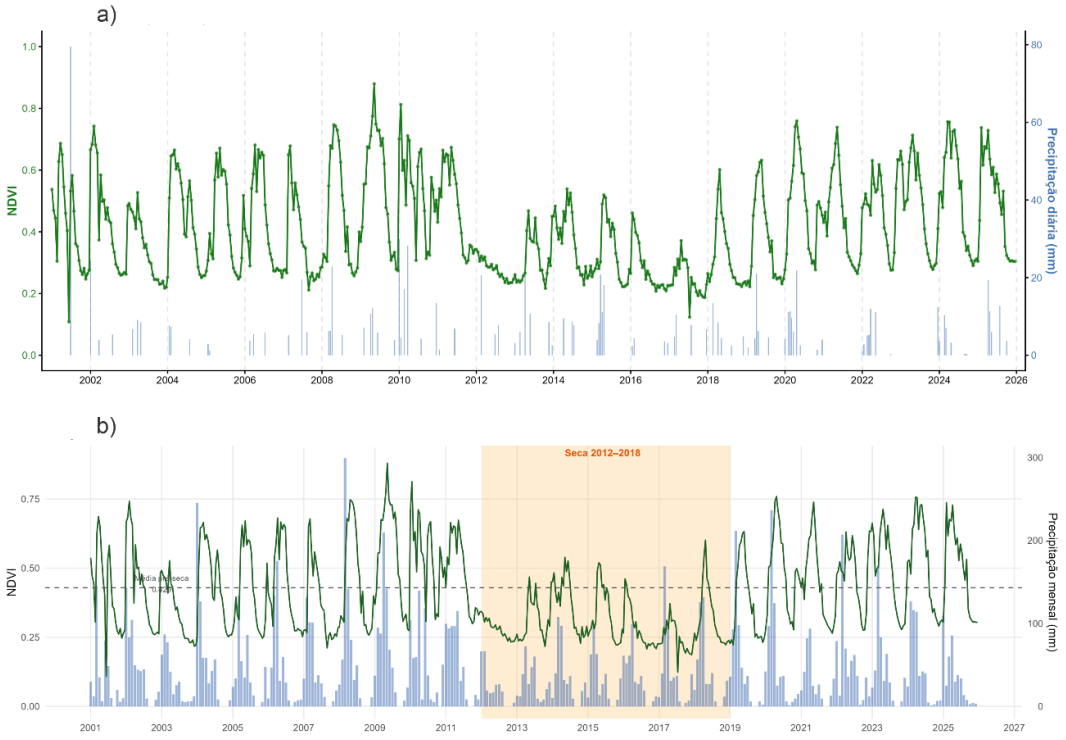


Figura 3: a) Serie temporal da NDVI (16 dias) e da Precipitação (diária) e b) apresenta o NDVI (16 dias) e Precipitação Mensal com destaque para seca do período de 2012 a 2018, os dados de a e b correspondem ao período de 2001 a 2025, NDVI linha solida verde e Precipitação colunas em azul.

Perfil de correlação por defasagem

A análise de correlação cruzada entre precipitação acumulada e NDVI revelou um padrão crescente e consistente ao longo dos *lags* avaliados (Figura 4). Para a precipitação acumulada (pacc),

a correlação de Pearson parte de r = 0,18 no *lag* zero, aumenta progressivamente, atingindo r = 0,63 aos 30 dias, *r* = 0,71 aos 60 dias, e alcança seu valor máximo de r = 0,713 no lag de 73 dias (r_s = 0,722), indicando que a precipitação acumulada nos 73 dias anteriores à composição MODIS é o melhor preditor do estado vegetativo da Caatinga neste pixel (Tabela 1).

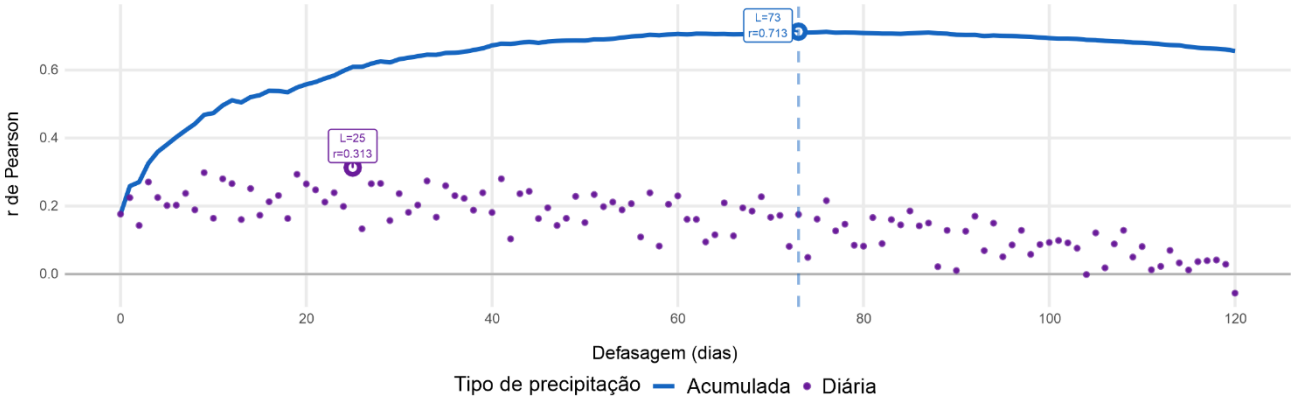


Figura 4: *Lags* diário e acumulados com a correlação com destaque a o *lag* com maior correlação de Pearson.

Tabela 1. *Lag* ótimo identificado para cada tipo de precipitação.

Tipo de precipitação	*Lag* ótimo (dias)	*r*	r_s
Acumulada (pacc)	73	0,713	0,722
Diária (pdia)	25	0,313	0,274

A partir do *lag* ótimo (*pacc*), a correlação decresce gradualmente, chegando a r = 0,66 aos 120 dias, o que sugere que a memória hídrica da vegetação diminui progressivamente além do período de aproximadamente dois meses e meio. Esse comportamento é consistente com os mecanismos ecofisiológicos de regiões semiáridas, onde o solo precisa ser infiltrado, disponibilizando água para as raízes das plantas e assim a vegetação ter uma resposta fotossintética relativamente lenta, mas sustentada, aos eventos pluviométricos (Ali Muter et al., 2025). Para a precipitação do dia exato (pdia), o *lag* ótimo foi de 25 dias (*r* = 0,313), valor substancialmente inferior ao encontrado para a precipitação acumulada. Essa diferença era esperada, pois a precipitação pontual de um único dia captura apenas o estímulo imediato, sem considerar o acúmulo hídrico antecedente que efetivamente governa a disponibilidade de água para a vegetação em regiões semiáridas.

Sazonalidade da resposta vegetativa

A correlação entre NDVI e precipitação acumulada no *lag* ótimo (pacc_73) varia consideravelmente ao longo dos meses do ano (Figura 5), evidenciando a sazonalidade da resposta vegetativa da Caatinga. Os meses de janeiro, fevereiro e março apresentam as maiores correlações (*r*

≈ 0,6), correspondendo ao período de transição entre a estação chuvosa e o início da estação seca, quando o acúmulo hídrico dos meses anteriores ainda governa o estado da vegetação.

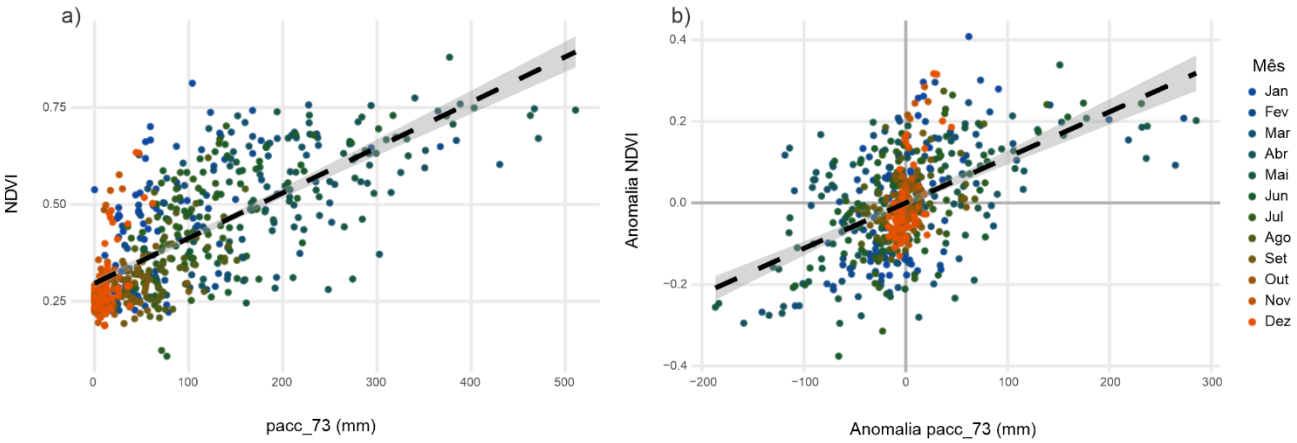


Figura 5: Correlação mensal entre (a) valores brutos do NDVI e a precipitação acumulada, e (b) anomalia do NDVI e a precipitação acumulada.

A correlação entre os valores brutos de precipitação acumulada no *lag* ótimo de 73 dias e o NDVI resultou em $r = 0,71$. Após a remoção do efeito sazonal por subtração da climatologia mensal, a correlação das anomalias foi de $r = 0,52$, indicando que 27% da correlação bruta é explicada pela variação sazonal entre as variáveis. O sinal interanual remanescente confirma que anos com precipitação acumulada acima da média nos 73 dias anteriores estão associados a valores de NDVI igualmente acima da média climatológica, evidenciando a sensibilidade da vegetação da Caatinga à variabilidade hídrica interanual.

CONCLUSÃO

Considerando os resultados apresentados, foi possível analisar a correlação da precipitação e vegetação através de imagens de satélites para uma bacia hidrográfica representativa da caatinga. A Bacia Hidrográfica do Alto Paraíba, mostrou que a vegetação sofre diretamente a influência da chuva no seu vigor vegetativo, onde apresentou maior correlação entre a chuva acumulado (pacc_L) do que eventos isolados (pdia_L).

A precipitação acumulada nos 73 dias anteriores à composição MODIS apresentou a maior correlação com o NDVI (r de Pearson = 0,713; r de Spearman = 0,722), indicando que a memória hídrica do solo, e não o estímulo pluviométrico imediato, governa o estado fotossintético da vegetação da Caatinga nessa escala temporal. A análise de anomalias, após remoção da sazonalidade, resultou em r = 0,52, confirmando que a sensibilidade da vegetação à variabilidade hídrica persiste além do ciclo sazonal anual e reflete a variabilidade interanual da precipitação. Esses resultados reforçam a

vulnerabilidade de ecossistemas semiáridos às mudanças climáticas, particularmente em cenários de alteração na frequência e magnitude dos eventos pluviométricos.

O estudo apresenta como limitação principal a resolução temporal de 16 dias do produto MODIS MOD13Q1, que impede a identificação do lag ótimo com precisão inferior a esse intervalo. Estudos futuros poderão ampliar a abordagem para escala espacial distribuída por toda a bacia, incorporar a análise de eventos hidrológicos individuais por meio da Análise de Época Superposta (SEA). O presente trabalho alcançou seu objetivo de quantificar a defasagem temporal entre precipitação e resposta do NDVI na Caatinga, contribuindo para o monitoramento ambiental e a gestão dos recursos hídricos em regiões semiáridas com limitações de dados observacionais.

REFERÊNCIAS

ALI MUTER, S.; AL-JIBOORI, M.H.; AL-TIMIMI, Y.K. (2025). "Assessment the Correlation between Rainfall and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) over Iraq". Italian Journal of Agrometeorology, v. 2, p. 79–94.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. (2013). "Köppen's climate classification map for Brazil". Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

AYBAR, C.; WU, Q.; BAUTISTA, L.; YALI, R.; BARJA, A. (2020). "rgee: An R package for interacting with Google Earth Engine". Journal of Open Source Software, v. 5, n. 51, p. 2272.

BARBOSA, H. A.; LAKSHMI KUMAR, T. V. (2016). "Influence of rainfall variability on the vegetation dynamics over Northeastern Brazil". Journal of Arid Environments, v. 124, p. 377–387.

BARRETT, T. et al. (2026). "Extension of "data.frame" [R package data.table version 1.18.4]". CRAN: Contributed Packages. 10.32614/CRAN.package.data.table.

DA SILVA, R. M.; SANTOS, C.A.G.; DA COSTA SILVA, J.F.C.B.; SILVA, A. M.; BRASIL NETO, R. B. (2020). "Spatial distribution and estimation of rainfall trends and erosivity in the Epitácio Pessoa reservoir catchment, Paraíba, Brazil". Natural Hazards, v. 102, n. 3, p. 829–849.

DIDAN, K. (2015). "MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006". MOD13Q1.006.

FUNK, C. et al. (2015). "The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes". Scientific Data, v. 2, n. 1, p. 150066.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. (2017) "Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, v. 202, p. 18–27.

JARDIM; A. M. d. R. F.; ARAÚJO JÚNIOR; G. d. N.; SILVA; M. V. d.; SANTOS; A. d.; SILVA; J. L. B. d.; PANDORFI; H.; OLIVEIRA-JÚNIOR; J. F. d.; TEIXEIRA; A. H. d. C.; TEODORO; P. E.; de Lima; J. L. M. P.; SILVA JUNIOR; C. A. d.; SOUZA; L. S. B. d.; SILVA; E. A.; & SILVA; T. G. F. d. (2022). "Using Remote Sensing to Quantify the Joint Effects of Climate and Land Use/Land Cover Changes on the Caatinga Biome of Northeast Brazilian". Remote Sensing, 14(8), 1911.

LIMA, R. G. S., DE SOUZA NETO, I. R.; DE ALMEIDA, A. Q.; SCHNEIDER, V. E.; MENDES, L. A. (2026). "Spatiotemporal evolution of hydroclimatic variables in the Brazilian Semi-Arid Region

through the aridity index and susceptibility to desertification". International Journal of Climatology, p. e70383.

LIU; L.; GOU; X.; WANG; X.; YANG; M.; QIE; L.; PANG; G.; WEI; S.; ZHANG; F.; LI; Y.; WANG; Q.; WANG; T. (2024). "Relationship between extreme climate and vegetation in arid and semi-arid mountains in China: A case study of the Qilian Mountains". Agricultural and Forest Meteorology, v. 348, p. 109938.

MARENGO; J. A.; CUNHA; A. P. M. A.; NOBRE; C. A.; RIBEIRO NETO; G. G.; MAGALHAES; A. R.; TORRES; R. R.; SAMPAIO; G.; ALEXANDRE; F.; ALVES; L. M.; CUARTAS; L. A.; DEUSDARÁ; K. R. L.; ÁLVALA; R. C. S. (2020). "Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C". Natural Hazards, v. 103, n. 2, p. 2589–2611.

DE MEDEIROS; I. C.; DA COSTA SILVA; J. F. C. B.; SILVA; R. M.; SANTOS; C. A. G. (2019). "Run-off-erosion modelling and water balance in the Epitácio Pessoa Dam river basin, Paraíba State in Brazil". International Journal of Environmental Science and Technology, v. 16, p. 3035-3048.

PATRIOTA; E. G.; BERTRAND; G. F.; SILVA; A. M.; DA SILVA; N.M.M.; MENDES; K. G. V.; DE SOUSA; J.W.G.; DA SILVA; R.M.; ALMEIDA; C.N.; CLAUDINO; C. M. A.; FARIAS; C. W. L. A.; DA COSTA SILVA; J. F. C. B.; COELHO; V. H. R. (2026). "A ride in Semi-arid: evaluation of remote sensing-based indices for the detection and monitoring of surface water bodies under dry and wet periods". Water Resources Management, v. 40, n. 8, p. 373.

PEREIRA DA SILVA; L. A.; PEREIRA DE SOUZA; C. M.; SANO; E. E.; PARREIRAS; T. C.; BOLFE; É. L.; SOUZA; B. I.; SOUZA; R. S.; LEITE; M. E.; ESPÍRITO-SANTO; M. M.; CHAGAS-REIS; C. C.; DA SILVA; I. C.; SENA-SOUZA; J. P.; DA SILVA; C. R. (2026). "Climate change-driven aridity threatens vegetation vigor in the Brazilian semiarid region". Remote Sensing Applications: Society and Environment, v. 42, p. 101972.

PEREIRA JUSTINO; S. T.; PAGANINI; E. A. L.; SILVA; R. B.; DE SOUSA SILVA; R. P.; ZABOTTO; A. R.; & RODER; L. R. (2025). "Spatial-temporal analysis of vegetation cover and soil degradation from Landsat time-series – A case study in the Caatinga, Brazil". Journal of South American Earth Sciences, v. 160, p. 105528, 1 jul. 2025.

SALVADOR, M. S. S.; PORTO DE LIMA, V. R. (2022). "Análise do processo de degradação da vegetação em uma área do bioma Caatinga". OKARA: Geografia em debate, v. 15, n. 2, p. 248–264.

SANTOS, L. A.; LATRUBESSE, E. M. (2021). "Aeolian mobility in the Middle São Francisco Dune Field, Northeast Brazil, as a response to Caatinga's droughts and land-use changes". Geomorphology, v. 393, p. 107940.

SHALWEE; DHUPPER; R.; KUMARI; M.; GUPTA; A.K.; KUMAR; D. (2025). "Multi-dimensional assessment of drought vulnerability with composite drought index and principal component analysis for socioeconomic development in Semi-Arid regions". Discover Applied Sciences, v. 8, n. 1, p. 35.

SILVA; J. J.; Duarte; E. F.; Kiill; L. H. P.; Gomes; R. A.; Dantas; B. F.; Pelacani; C. R.; & Funch; L. S. (2023). "Phenological dynamics of four populations of Handroanthus spongiosus in seasonally dry tropical forest in Brazil". Flora, v. 306, p. 152371.

The Rcore Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing Reference Index The R Core Team. , 24 abr. 2026. Disponível em: <https://www.gnu.org/copyleft/gpl.html.>. Acesso em: 4 jun. 2026

WICKHAM, H. et al. (2026). "Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics [R package ggplot2 version 4.0.3]". CRAN: Contributed Packages.