

Assessment of vegetation cover in an area benefited by the East Axis of the Transposition of São Francisco River, using ADIVA

Juliana Patrícia Fernandes Guedes Barros^{*}, Camila Gardenea de Almeida Bandim^{*}, Gabriel Antonio Silva Soares^{*}, Joélia Natália Bezerra da Silva^{**}, Carlos José dos Santos Freitas^{***}, Magna Soelma Beserra de Moura^{****}, Josicléda Domiciano Galvínio^{*****}

^{*}Mestrandos, Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, E-mail: juliana.guedesbarros@ufpe.br, camila.bandim@ufpe.br, gabriel.antonios@ufpe.br

^{**}Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, E-mail: joelia.nataliageo@gmail.com.

^{***}Licenciado em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, E-mail: carlos.santosfreitas@ufpe.br

^{****}Pesquisadora, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Semiárido, Petrolina, Pernambuco, Brasil, E-mail: magna.moura@embrapa.br

^{*****}Professora do Departamento de Ciências Geográficas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, E-mail: josicleda.galvancio@ufpe.br

Received 01 November; accepted 19 December.

Abstract

The municipality plays an essential role in regulating environmental cycles and in the sustainable development of economic and social activities. In the semi-arid region, the loss of vegetation cover poses a serious problem in maintaining natural cycles, especially given the environmental fragility of the ecosystem and projections of changes in the global climate. Mapping vegetation cover stands out as a crucial tool for monitoring and understanding such changes, guiding adaptation and mitigation policies. With the objective of evaluating the dynamics of vegetation cover in the municipality of Floresta and the changes in land use and coverage in the areas benefited by the Integration Project of the São Francisco River Basin with the Northern Northeast Basins (PISF), and understanding the changes and problems driven by the elimination of Caatinga vegetation. Images from the Landsat 8 OLI sensor were used for the years 2013, 2015, 2016, 2019, 2021 and 2023. The images were processed in the ADIVA software, and NDVIs of the study area were obtained. The results demonstrate that land use conditions in the Caatinga promoted loss of vegetation cover, with retraction of vegetated areas and expansion of exposed soil. The lack of conservation policies should accentuate environmental problems and the management of natural resources, which are already limited in the semi-arid region.

Keywords: Caatinga, Environmental Degradation, Environmental impacts, Remote Sensing, Vegetation Indexes.

Avaliação da cobertura vegetal de área beneficiada pelo Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco, utilizando ADIVA

Resumo

A vegetação desempenha papel essencial na regulação dos ciclos ambientais e desenvolvimento sustentável das atividades econômicas e sociais. No semiárido a perda da cobertura vegetal configura grave problema a manutenção dos ciclos naturais, sobretudo tendo em vista a fragilidade ambiental do ecossistema e as projeções de mudanças no clima global. O mapeamento da cobertura vegetal ganha destaque como uma ferramenta crucial para monitorar e entender tais mudanças, orientando políticas de adaptação e mitigação. Com o objetivo de avaliar a dinâmica da cobertura vegetal do município de Floresta e as mudanças no uso e cobertura do solo nas áreas beneficiadas pelo Projeto de Integração da Bacia do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional (PISF), e compreender as modificações e problemáticas impulsionadas pela degradação da vegetação da Caatinga. Foram utilizadas imagens do sensor OLI do Landsat 8 para os anos de 2013, 2015, 2016, 2019, 2021 e 2023. As imagens foram processadas no software ADIVA, e obtidos NDVIs da área de estudo. Os resultados demonstram que as condições de uso do solo na Caatinga promoveram perda da cobertura vegetal, com retração de áreas vegetadas e expansão de solo exposto. A falta de políticas de conservação deve acentuar os problemas ambientais e degradação dos recursos naturais, já limitados no semiárido.

Palavras-chave: Caatinga, Degradação Ambiental, Impactos ambientais, Sensoriamento Remoto, Índices de Vegetação.

1. Introdução

O mapeamento da cobertura vegetal é uma abordagem fundamental para compreender a dinâmica ambiental e as transformações do uso da terra ao longo do tempo. A vegetação desempenha papel essencial na manutenção dos ecossistemas, na regulação climática e na disponibilidade hídrica (Brasil, 2017). No semiárido brasileiro, região caracterizada por episódios cíclicos de seca e uma complexa interação entre fatores climáticos, antrópicos e ecológicos, o mapeamento da cobertura vegetal adquire relevância ainda maior no diagnóstico das alterações antrópicas sobre a paisagem natural. As atividades humanas, como a agricultura e a criação de gado, têm modificado significativamente a cobertura vegetal em regiões semiáridas, por consequência afetando as características biofísicas da vegetação e as respostas espectral dos alvos em superfície (Cunha; Alvalá; Oliveira, 2013).

O bioma Caatinga, recobre 11% do território nacional e 70% da região Nordeste, é um dos mais alterados em escala nacional dentre os biomas brasileiros. Grande parte de seu domínio original foi degradado devido à exploração inadequada dos recursos naturais, estima-se que cerca de 43% de sua área total foi alterada pela ação antrópica, afirmação que coloca a caatinga como o terceiro bioma brasileiro mais modificado pela ação humana (Correia *et al.*, 2011). De acordo com os relatórios anuais de cobertura e uso da terra publicados pelo MapBiomas, nos últimos 37 anos o Brasil enfrenta grave perda da vegetação, decorrente da expansão urbana e fronteiras agrícolas, na caatinga, entre 1985 e 2022, foram perdidos 11% da área de vegetação nativa (MapBiomas, 2022). Tal degradação da cobertura vegetal representa um desafio para o desenvolvimento sustentável brasileiro e resulta em graves impactos para a população que habita o sertão.

No contexto da degradação ambiental e das transformações na cobertura vegetal do semiárido brasileiro, destaca-se a relevância do Projeto de Integração da Bacia do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional (PISF). O PISF representa a maior obra de infraestrutura hídrica brasileira, que visa a ampliação da oferta hídrica no semiárido para atendimento dos usos múltiplos d'água, com

direcionamento prioritário ao abastecimento humano. A captação de água do Rio São Francisco abastece os estados do Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte (Castro e Cerezini, 2022). A adução d'água para áreas historicamente afetadas pela escassez e irregularidade das chuvas, influencia diretamente a dinâmica da cobertura vegetal e uso do solo, além intensificar conflitos ambientais pelo uso da água já presentes nas regiões atendidas pelo projeto (Silva *et al.*, 2015).

As mudanças climáticas emergem como um fator adicional de preocupação. O aumento da temperatura e as variações nos padrões de chuva devem agravar os desafios enfrentados pelas populações já vulneráveis. O semiárido brasileiro é notório pela irregularidade e intensidade das chuvas, o que resulta em uma convivência histórica com secas recorrentes. Ao longo dos anos, esses eventos têm exercido um impacto profundo nas atividades econômicas e na qualidade de vida das populações locais. Como apontam Marengo, Cunha e Alves (2016), o semiárido passou por uma série de secas severas e prolongadas, influenciando o modo de vida das comunidades e a ocupação do território. Os autores discorrem ainda sobre a perspectiva de aumento na frequência e duração dos períodos secos e de secas futuras no semiárido brasileiro.

Em concordância com as projeções de Marengo, Cunha e Alves (2016), Lacerda *et al.* (2009) em estudos realizados na microrregião do Pajeú, indicam um aumento significativo nos períodos seco, no comprimento médio dos veranicos e na duração dos veranicos máximos, afetando o volume pluviométrico durante o período chuvoso. A tendência das séries de precipitação demonstra aumento na ocorrência de extremos de seca e precipitação, que resultam em modificações mais severas na cobertura vegetal da região, impondo desafios crescentes ao desenvolvimento socioeconômico e sustentável do semiárido.

Os efeitos da precipitação sobre a cobertura vegetal no semiárido brasileiro foram objeto de análise por Barbosa *et al.* (2019). Os pesquisadores argumentam que a vegetação da caatinga está profundamente vinculada à disponibilidade hídrica. A interferência humana e as alterações no padrão de precipitação, sobretudo durante a estação seca, identificada como o período de maior vulnerabilidade, conduzem à

degradação da cobertura vegetal e ao aumento da extensão das áreas sujeitas à desertificação.

Tendo em vista o cenário de degradação ambiental e seus impactos, o mapeamento da cobertura vegetal ganha destaque como ferramenta crucial para monitorar e entender tais mudanças, orientando políticas de adaptação e mitigação. Técnicas de sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizadas na análise da cobertura vegetal e do uso do solo, permitindo compreensão das mudanças na paisagem e dos impactos da atividade antrópica em extensas áreas. Silva *et al.* (2020) e Silva *et al.* (2019) ressaltam a relevância do emprego de sensoriamento remoto, especialmente dos índices de vegetação, para a compreensão do comportamento e da dinâmica da cobertura vegetal na Caatinga. Tais abordagens contribuem para o monitoramento da resposta espectral da vegetação, viabilizando a análise e o mapeamento da cobertura vegetal em escala global.

Quanto às características temporais da vegetação e o uso de índices, Jensen (2009) discorre que os índices de vegetação são importantes parâmetros biofísicos, a reflectância dos alvos vegetativos permite compreender impactos e mudanças na cobertura além do vigor das áreas vegetadas. Dentre os índices de vegetação, o mais difundido é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), proposto por Rouse *et al.* (1974), cujo valores variam entre -1 e 1, valores próximos de 1 correspondem a áreas com alto vigor vegetativo enquanto valores baixos estão relacionados a estresse da vegetação ou áreas de solo exposto (Jensen, 2009).

Estimativas de NDVI no semiárido, com emprego de imagens de satélite, vêm sendo realizadas por diferentes autores em larga escala (Barbosa *et al.*, 2019; Cunha *et al.*, 2012; Francisco *et al.*, 2012; Leivas *et al.*, 2022; Ribeiro *et al.*, 2016; Silva; Galvêncio, 2013; Silva *et al.* 2020; Silveira *et al.*, 2022). Outros parâmetros biofísicos também foram empregados visando a obtenção de resultados sobre a degradação ambiental no semiárido, como SAVI, IAF e albedo da superfície (Bezerra *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2019; Cunha; Alvalá; Oliveira, 2013; Galvêncio *et al.*, 2016; Hyvärinen; Hoffman; Reynolds, 2019; Jardim *et al.* 2022; Oliveira *et al.*, 2012). Os resultados demonstram que os índices de vegetação são importantes parâmetros

biofísicos para compreender a evolução da cobertura vegetal, sobretudo no semiárido brasileiro que vem sofrendo de forma pronunciada com a ação antrópica desordenada e sem perspectiva conservacionista, além dos impactos da variabilidade climática interanual que afeta o vigor dos alvos vegetativos.

A proposta do mapeamento da cobertura vegetal ganha apoio a partir do desenvolvimento tecnológico e científico dos sistemas de sensoriamento remoto. Nesse contexto, o software de Análise Digital da Vegetação e Água (ADIVA) desempenha um papel significativo, permitindo o processamento eficiente de imagens de satélite em larga escala. O ADIVA (sites.ufpe.br/sergeo/) representa um avanço importante na capacidade de avaliar a cobertura vegetal com precisão e regularidade, e facilita o processamento simultâneo de imagens de satélite e drone. O software é fruto da parceria multiinstitucional entre a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e a Agência Pernambucana de Água e Clima (APAC) (Galvêncio *et al.*, 2022). Atualmente está em fase de desenvolvimento, a fim de aprimorar os recursos disponíveis para análise ambiental. O software ADIVA foi empregado para o processamento das imagens de satélite e cálculo do NDVI. A abordagem permitiu avaliação da cobertura vegetal, identificando áreas de aumento ou redução da vegetação ao longo do tempo, a partir da interpretação espectral das imagens utilizadas.

Bons resultados com uso do ADIVA foram obtidos por Santos (2023) e Santos *et al.* (2023), os autores utilizaram o ADIVA para detecção de fitoplâncton, aplicando Índice de área foliar (IAF), no reservatório de Mangueira, inserido na bacia hidrográfica do rio Terra Nova e demonstraram que o IAF se mostrou útil para detecção de comunidades fitoplanctônicas em reservatórios do semiárido, auxiliando nos processos de gestão da água e garantia de segurança hídrica. Luz e Galvêncio (2023) e Galvêncio e Souza (2022) também obtiveram resultados promissores ao empregar o ADIVA para análises no semiárido pernambucano.

Tendo em vista a importância de pesquisas direcionadas ao estudo do comportamento da vegetação, e as perspectivas de mudanças climáticas no semiárido brasileiro o objetivo do

estudo é analisar a dinâmica da cobertura vegetal do município de Floresta e as mudanças no uso e cobertura do solo nas áreas beneficiadas pelo Projeto de Integração da Bacia do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional (PISF), e compreender as modificações e problemáticas impulsionadas pela degradação da vegetação da Caatinga.

2. Material e métodos

Área de estudo

A área de estudo compreende o município de Floresta (Figura 1), localizado na mesorregião do São Francisco, semiárido pernambucano. A sede municipal está localizada entre as coordenadas geográficas: 8°36'00" de latitude sul e 38°34'00" de longitude oeste de Greenwich (Araújo Filho *et al.*, 2001). Com base nos dados do Censo 2022, o município possui 30.144 habitantes e unidade territorial de 3.604,948 km², resultando em baixa densidade demográfica em

comparação ao estado de Pernambuco (IBGE, 2023). Dentre os cursos d'água que drenam a região, destaca-se o rio Pajeú, cujo principal afluente é o riacho do Navio, que é intermitente e deságua no rio São Francisco. O município comporta também o eixo Leste do PISF, com cinco pontos de entrega localizados nos limites do território (APAC, 2013; MDR, 2023).

A Caatinga, bioma predominante no semiárido, possui diversidade de variações de acordo com as condições dos padrões climáticos e orográficos, conferindo alta diversidade biológica em comparação a outras regiões áridas e semiáridas do globo. A vegetação na área de estudo é predominantemente composta pela Caatinga hiperxerófila e algumas áreas de floresta caducifólia, caracterizadas pela elevação do terreno e formação de brejos de altitude (Silva *et al.*, 2013; CPRM, 2005). Entre as características marcantes da vegetação local está a intrínseca associação com o clima, as florestas são sazonalmente secas devido a irregularidade no regime de precipitação.

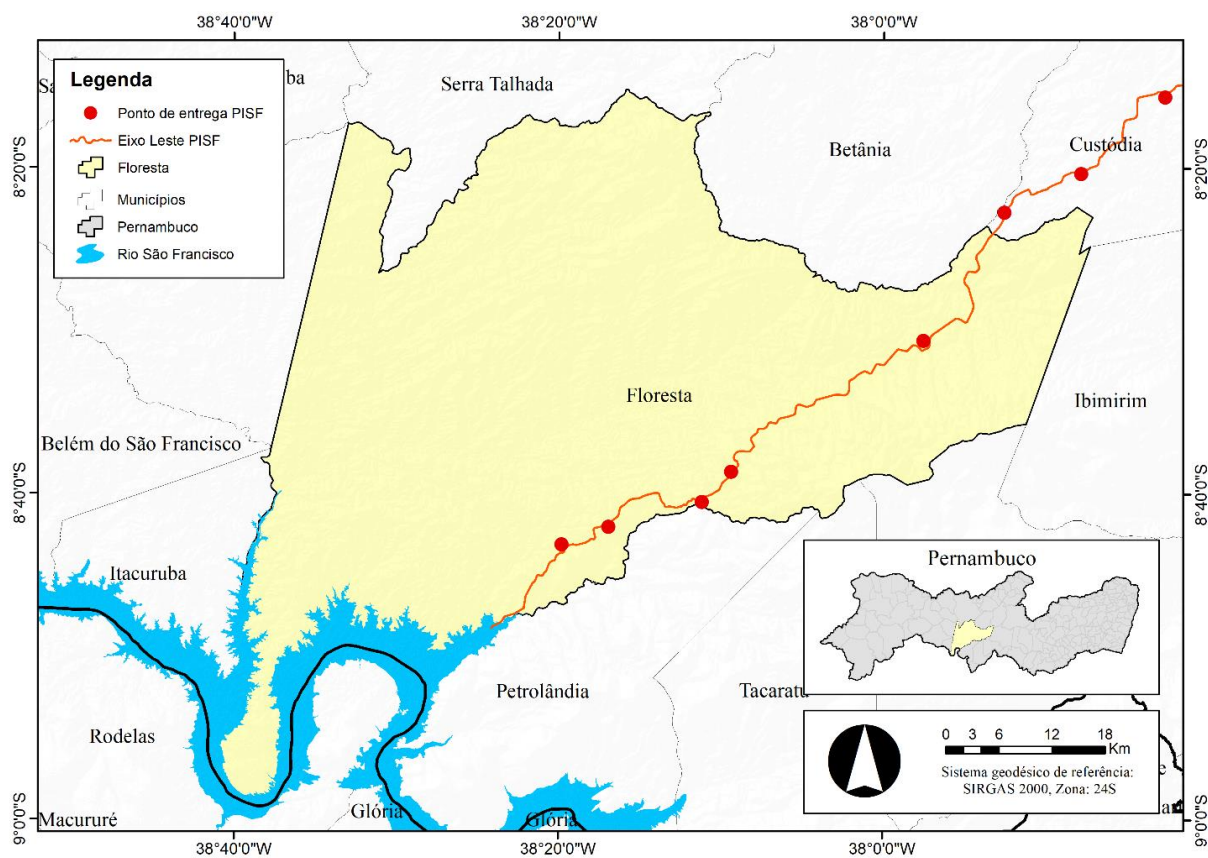


Figura 1: Mapa de localização do município de Floresta, Pernambuco.

A região apresenta um sistema agrário predominantemente baseado na pecuária extensiva, agricultura de sequeiro e áreas irrigadas concentradas próximo aos corpos

hídricos. A agricultura de sequeiro é voltada principalmente para subsistência, junto a pecuária extensiva são conduzidas com baixos padrões tecnológicos, resultando em vulnerabilidade às

mudanças climáticas. O que leva as populações locais a recorrerem ao extrativismo, como a exploração da caatinga para venda de lenha e carvão, contribuindo para a degradação ambiental. Tais formas de uso indiscriminado, sem perspectiva de conservação da vegetação nativa, aceleram o processo de degradação ambiental, expresso pela salinização dos solos, desertificação e perda da cobertura vegetal do município (Araujo Filho *et al.*, 2001).

O clima semiárido, o qual o município está submetido, possui acentuada variabilidade temporal e espacial das precipitações pluviométricas, com variação interanual entre secas e extremos de precipitação, as médias anuais de precipitação são inferiores a 800 mm e as temperaturas médias variam entre 23° a 27 °C (Moura *et al.*, 2012). É característico da região semiárida a insuficiência das precipitações em relação às altas taxas de evapotranspiração, resultando em déficits hídricos significativos (Marengo *et al.*, 2011). O tipo climático predominante sobre a região Nordeste, segundo classificação de Koeppen (1948), é o Bsh; definido como Clima Semi-árido quente, com características de escassez e irregularidade de chuvas, forte insolação, baixa nebulosidade e índices elevados de evapotranspiração.

Procedimentos metodológicos

Para o estudo foram utilizadas imagens do sensor OLI do Landsat 8, na órbita e ponto 216-066, disponíveis gratuitamente na plataforma Earth Explorer (earthexplorer.usgs.gov) com o objetivo de analisar a cobertura vegetal do município de Floresta durante o período de implementação do PISF. Foram coletadas imagens de 2013 a 2023 com intervalos de dois anos entre as imagens

quando possível. O critério para escolha das datas levou em consideração o período seco entre agosto e outubro, a baixa cobertura de nuvens e proximidade entre as datas e órbitas, foram coletadas imagens de 2013, 2015, 2016, 2019, 2021 e 2023. Optou-se por selecionar o período de menor incidência de chuvas, a fim de garantir que as análises não fossem afetadas pelas alterações na paisagem decorrentes das precipitações sobre a área de estudo.

A metodologia empregada baseia-se no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), calculado a partir de imagens de satélite. O NDVI é um índice radiométrico adimensional que varia entre -1 e 1. O processamento dos dados foi realizado através do *software* ADIVA.

O *software* ADIVA é capaz de realizar estimativas para áreas plantadas, definição de regiões com potencial de produção, monitoramento de safras, monitoramento de secas, aplicação de nutrientes, manejo de irrigação, manejo de pragas e doenças, previsão de produção, mapeamento de áreas irrigadas, monitoramento de reservatórios, dentre outros (Galvêncio *et al.*, 2022). Utilizando o *software*, é possível calcular NDVI, Índice de Umidade por Diferença Normalizada ou Índice de Água (NDWI), Índice de área Foliar (LAI) e Índice de Vegetação Resistente à Atmosfera (SAVI), para imagens de drone, Landsat 8 e CBERS 4A.

A princípio foi realizada as correções e calibrações necessárias para processamento das imagens de entrada. Para calibração radiométrica, o ADIVA utiliza a equação proposta por Markham e Baker (1987):

$$L_{\lambda i} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{max} - Q_{min}} \right) \times (Q - Q_{min}) + LMIN_{\lambda} \quad (\text{eq. 01})$$

$$L_{\lambda i} = \frac{b_i - a_i}{255} \times ND + a_i \quad (\text{eq. 02})$$

$$L_{\lambda i} = G_{\text{rescale}} \times ND + B_{\text{rescale}} \quad (\text{eq. 03})$$

Onde a_i e b_i são as radiâncias espectrais mínima e máxima; ND é a intensidade do pixel, i corresponde às bandas dos satélites. Os dados utilizados nos coeficientes de calibração foram obtidos no arquivo MTL das imagens das imagens do Landsat 8 – OLI, para as imagens do CBERS não foram realizadas calibrações radiométricas.

Para o cálculo da reflectância foi utilizada a equação de Bastiaanssen *et al.* (1998). Para obtenção dos valores de $\cos(z)$ e d_r foram utilizadas as equações de Allen *et al.* (2002) e Silva; Lopes; Azevedo (2005).

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \times L_{\lambda i}}{k_{\lambda i} \times \cos(Z) \times d_r} \quad (\text{eq. 04})$$

$$\cos(Z) = \cos(90 - E) \quad (\text{eq. 05})$$

$$d_r = 1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{DSA \times 2\pi}{365}\right) \quad (\text{eq. 06})$$

Onde $L\lambda_i$ é o resultado da calibração radiométrica, $\cos(Z)$ é o cosseno do ângulo zenital solar (eq. 03), e d_r é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol em unidade astronômica para cada dia específico do ano (eq. 04).

Para obtenção do NDVI foi utilizada a equação de Rouse *et al.* (1974):

$$NDVI = \left(\frac{NIR - Red}{NIR + Red} \right) \quad (\text{eq. 07})$$

Onde NIR corresponde a banda do infravermelho próximo e Red a banda do vermelho, respectivamente as bandas 5 e 4 do Landsat 8 - OLI.

3. Resultados e discussão

A figura 2 apresenta os resultados do NDVI para o município de Floresta, no estado de Pernambuco. Os resultados foram obtidos por meio da utilização do *software* ADIVA e abrangem o período de 2013 a 2023. Importante destacar que a versão do *software* utilizada para processar os dados, inclui procedimento de filtragem para remoção de valores discrepantes e ruídos das imagens. Portanto, é necessário salientar que ocorre a eliminação de pixels nas áreas correspondentes aos corpos hídricos, como o rio São Francisco.

Nas cenas representadas pelas figuras 2A, B, C, D, E e F, os valores mais próximos de 1, que estão representados por coloração esverdeada,

indicam vegetação densa, com maior vigor vegetativo. Já as cores mais quentes e avermelhadas correspondem a áreas com menor densidade vegetativa e solo exposto, com valores próximos a zero. Os valores negativos, inferiores a zero, estão associados aos corpos hídricos e são representados em azul nas imagens.

A resposta espectral do NDVI está relacionada às particularidades da faixa do vermelho (Red) e infravermelho próximo (NIR). A estrutura celular dos alvos vegetativos reflete com maior eficiência a banda do NIR, na faixa de 0,7 a 1,1 μm . Os sensores acoplados aos satélites em órbita captam a reflectância dentro do comprimento de onda do NIR e Red, possibilitando classificar os alvos em superfície com base na resposta espectral, os valores oriundos permitem discriminá-los (Jensen, 2009; Rouse *et al.*, 1974). Desse modo, o NDVI possibilita a avaliação das mudanças ao longo do tempo, através do estudo do comportamento da cobertura vegetal, o que permite analisar a evolução da degradação ambiental ao longo dos anos.

A resposta espectral da vegetação revelou variações ao longo do intervalo de tempo analisado, apresentando expansão e retração em diferentes períodos, conforme exposto pelos NDVIs (Figura 2). Os valores mais baixos prevalecem no intervalo de até 0,23, sendo associados a corpos hídricos, estradas, edificações e solo exposto. Enquanto, os valores mais elevados, situados no intervalo de até 0,84, correspondem à vegetação nativa e áreas agrícolas.

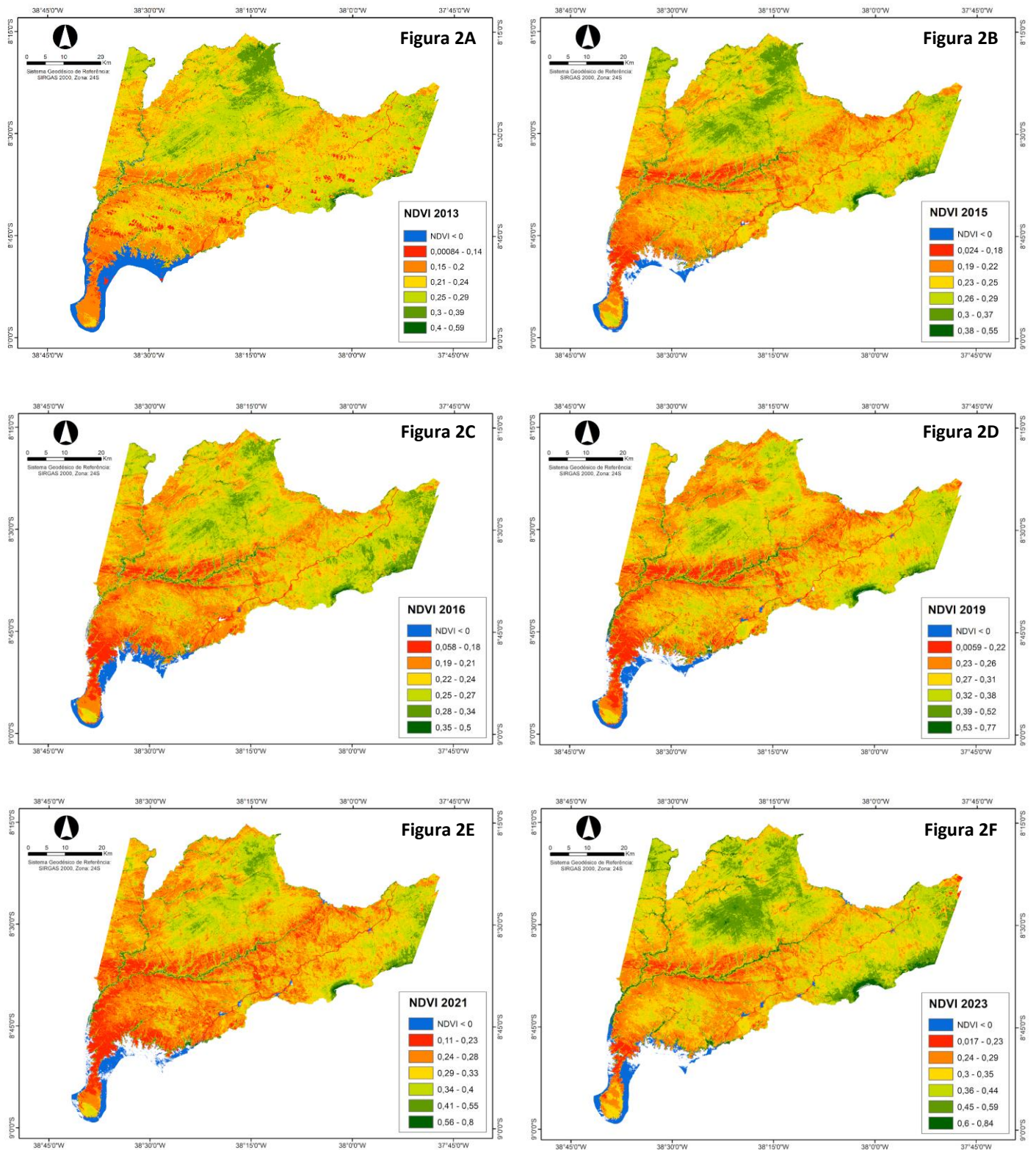


Figura 2: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) do município de Floresta, Pernambuco, para os anos de 2013 (2A), 2015 (2B), 2016 (2C), 2019 (2D), 2021 (2E) e 2023 (2F)

A imagem adquirida para o ano de 2013 (Figura 2A) possui interferência de cobertura de nuvens, concentradas no leste do município. O número de classes adotado não foi suficiente para diferenciar a cobertura de nuvem do solo exposto, desse modo o intervalo até 0,18 na imagem para o ano de 2013 engloba nuvens, juntamente com a área de sombra e algumas áreas de solo exposto. As demais imagens não apresentam cobertura de nuvem, tão pouco confusão entre os alvos representados.

Na Figura 2A, B, C, D, E e F, observa-se ainda que o solo exposto exibe valores baixos, variando entre 0,18 e 0,29. Os limites desses valores demonstram uma tendência de variação ao longo dos anos de análise, concentrando-se principalmente na região sudoeste do município. A área abrangida pelos valores associados ao solo exposto expandiu-se entre 2013 e 2021. Em contrapartida, a resposta do NDVI para 2023 revela uma redução nas áreas de solo exposto, em relação a tendência apresentada pelas imagens dos anos anteriores, o que pode estar relacionado à data de aquisição da imagem por satélite, que ocorreu no mês de agosto, diferentemente das demais imagens, que foram obtidas nos meses de setembro e outubro.

Bezerra da Silva *et al.* (2020) e Silva, Almeida e Silva (2017), discutem que os padrões climáticos são influentes determinantes sobre a cobertura vegetal da caatinga, resultando em alterações na resposta espectral dos alvos em superfície, por esse motivo a análise da degradação ambiental e retração da área vegetada deve ser realizada em datas próximas e respeitando a sazonalidade climática da região. Percebe-se pela resposta do NDVI para 2023, que mesmo dentro dos meses de menor precipitação há variações no regime de chuvas e consequentemente no vigor vegetativo.

Morais *et al.* (2011) conduziram uma análise da cobertura vegetal para o município de Floresta para os anos de 1994 e 2007, identificando características semelhantes na área de estudo. Os autores apontam que a maior presença de solo exposto no Sudoeste se deve à natureza pedológica da região, que é composta por luvissolos rasos que dificultam o crescimento de vegetação arbórea densa. Araújo Filho (2011) menciona que as relações entre o solo e a paisagem desempenham um papel fundamental no desenvolvimento da cobertura vegetal no

contexto da caatinga. A condição de limitação e irregularidade no regime de chuvas do clima semiárido, juntamente com outros fatores de formação, como relevo e material de origem, resulta em um mosaico de diferentes tipos de solos, destacam-se solos pedregosos frequentemente associados a afloramentos rochosos, predominantes na Depressão Sertaneja pernambucana.

Ribeiro *et al.* (2016) também encontraram resultados semelhantes sobre a predominância de solo exposto, em estudos de detecção de mudanças ambientais na bacia hidrográfica do Pajeú. No percentual de distribuição dos pixels nas classes do EVI, a faixa entre 0,21 e 0,21 teve a distribuição espacial mais expressiva sobre a bacia, entre os anos de 2003 a 2014. A maior predominância pôde ser observada ao Sul da bacia do Pajeú, justamente onde está localizado o município de Floresta. Os resultados se assemelham também aos obtidos por França *et al.* (2013), para o município de Ibimirim, Sertão pernambucano, os autores constataram prevalência da classe de solo exposto, para as cenas referentes aos anos de 1993, 1995, 1998, 2006 e 2010, com EVI inferior a 0,25.

A vegetação da caatinga sofre impactos durante os períodos secos, com diminuição da densidade vegetativa, em decorrência dos diminutos índices pluviométricos e condições climáticas que acentuam a frequência e ocorrência de secas. Como citado por Galvêncio *et al.* (2016), em relação às variações na vegetação nos períodos secos e chuvosos no município de Belo Jardim, semiárido pernambucano.

No Nordeste, mais especificamente nas regiões do agreste e sertão, são encontradas as áreas mais susceptíveis à alteração de suas espécies de plantas nativas. Isto se dá devido ao elevado grau de estresse hídrico sofrido pelas plantas decorrentes dos períodos mais secos. É aí também que ocorre uma resposta mais rápida em termos de aumento da atividade fotossintetizante nos períodos úmidos (Galvêncio *et al.*, 2016, p. 134).

A diferenciação entre as classes de NDVI para entendimento da fitofisionomia da caatinga se relaciona com tais questões de influência. A resposta dos índices de vegetação, aplicados por diferentes autores a caatinga (Barbosa *et al.*, 2019; Cunha *et al.*, 2012; Francisco *et al.*, 2012;

Leivas *et al.*, 2022; Ribeiro *et al.*, 2016; Silva; Galvêncio, 2013; Silveira *et al.*, 2022), demonstram a intrínseca relação estabelecida entre os fatores climáticos e a vegetação. Que somados à exploração dos recursos naturais do bioma Caatinga e as alterações no uso do solo, configuram a degradação da cobertura vegetal nativa. Esses fatores contribuem para a intensificação de elementos desencadeadores do processo de desertificação, especialmente em um ambiente naturalmente frágil como a Caatinga, conforme destacado por Pereira, Oliveira Junior e Lobão (2020).

As alterações sobre a densidade da vegetação podem ser percebidas na análise dos NDVIs para os anos de 2013, 2015, 2016, 2019, 2021 e 2023 (figuras 2A, B, C, D, E e F). Os três primeiros anos apresentam valores máximos que variam entre 0,5 e 0,59. Enquanto, nos três anos seguintes o NDVI máximo foi de 0,84, para o ano de 2023. Tais resultados evidenciam as diferentes unidades da paisagem presentes no município, e o condicionamento da cobertura vegetal. Observa-se que os valores estão relacionados às condições climáticas e ao crescimento da agricultura irrigada no submédio do rio São Francisco. Segundo Castro (2011) o aumento da oferta hídrica para usos múltiplos no semiárido acrescido da implementação de projetos para o desenvolvimento da agricultura irrigada, oriundo do PISF, deve gerar expansão da área agrícola, com impactos ao desenvolvimento socioeconômico da referida região e modificação no uso do solo das áreas beneficiadas pelo projeto.

Os impactos sobre a área diretamente afetada pelo Eixo Leste do PISF no município de Floresta foram investigados por Moura (2020), a autora destaca que Floresta possui a maior porcentagem de alteração sobre a cobertura vegetal, com redução das áreas de savana-estépica e aumento das áreas antropizadas no município.

O relevo exerce também uma forte influência sobre os valores máximos do NDVI observados nas figuras, que se assemelham aos encontrados em regiões úmidas. Percebe-se que há predominância a Norte e a Nordeste do município de valores mais próximos a 1, que indicam maior vigor vegetativo e aumento da densidade da cobertura vegetal. A presença de brejos de altitude nas referidas regiões é responsável pelos valores, uma vez que a altitude possui influência sobre a precipitação e umidade

relativa da região. Morais *et al.* (2011) obtiveram com uso de NDVI valores entre 0.595 a 0.803 para a mesma região, nos anos de 1994 e 2007. As regiões de altitude elevada como a Reserva Biológica da Serra Negra, contribuem com a resposta espectral observada na figura 2A, B, C, D, E e F.

Quanto aos intervalos referentes a vegetação arbustiva, de menor densidade na caatinga, percebe-se que entre os anos avaliados há retração e expansão da área. O não ajuste das condições do solo na estimativa do NDVI estão relacionados às respostas apresentadas. De acordo com Francisco *et al.* (2012), na distinção entre classes de vegetação no semiárido, utilizando NDVI, SAVI e EVI, salientam que o SAVI apresentou melhor correlação e melhor amplitude das leituras de reflectância. Tais características conferem ao SAVI uma capacidade superior de interpretação espectral dos alvos vegetativos, possibilitando uma separação mais precisa das classes de biomassa vegetal.

Mesmo diante da dificuldade de diferenciação, é possível inferir uma tendência de perda de áreas de Caatinga menos densamente vegetadas, com resultados que variam na faixa entre 0,2 e 0,3, em detrimento da categoria de solo exposto. Galvêncio *et al.* (2016) realizaram análise para o município de Belo Jardim, PE, que apresenta semelhanças com a tendência observada nos resultados para o município de Floresta. Os autores inicialmente constataram uma predominância de vegetação esparsa, a qual, num curto intervalo de tempo entre 1998 e 2004, passou a exibir uma resposta espectral típica de vegetação mais rasteira, resultando em um aumento na cobertura da área analisada, de 10,96% para 56,44%. Os autores também discutem que os resultados observados estão relacionados a oscilações climáticas que ocorrem cada vez com mais frequência e intensidade, corroborando com as previsões de impacto do aumento da temperatura sobre a perda florestal apresentadas pelo Sexto Relatório de Avaliação (AR6), do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023).

Um ponto de importante análise, é o aumento dos corpos hídricos comparando os anos de 2013 e 2023. Verifica-se que no NDVI do ano 2023 (figura 2F) há representação dos reservatórios construídos pelo PISF, na faixa dos valores de NDVI < 0, assim como o trecho do

canal do eixo Leste da transposição que corta o município de Floresta, lido pelo NDVI como solo exposto, devido as propriedades do material de construção dos canais. Tendo em vista as questões relacionadas à escassez hídrica no semiárido e a importância da vegetação na dinâmica hídrica, Silva *et al.* (2020) destacam a necessidade de medidas sustentáveis para o controle dos recursos hídricos. Os autores ressaltaram a importância do planejamento e da aplicação de medidas sustentáveis de controle dos recursos hídricos e alerta para o aumento das áreas expostas de solo e a substituição de áreas florestais por pastagens, prejudicando o balanço energético do semiárido. Destacam-se as acentuações no risco de degradação ambiental devido a déficits de chuvas e aumento da temperatura. Os autores concluem, que as mudanças no uso do solo ao longo do tempo agravaram a perda de vegetação e recursos hídricos, contribuindo para condições de alterações no microclima local e déficit hídrico acentuado.

No contexto do semiárido brasileiro, é crucial ressaltar a variabilidade pluviométrica caracterizada por chuvas concentradas e irregularmente distribuídas ao longo do território. Essa particularidade resulta em uma vegetação altamente dinâmica, tornando fundamental o monitoramento constante das alterações sobre a cobertura vegetal e uso do solo. Diante desse cenário, torna-se indispensável a realização de estudos aprofundados sobre o ambiente semiárido, especialmente considerando suas vulnerabilidades e suscetibilidades naturais, as quais são intensificadas pela atividade humana. Esta última, ao acelerar os processos de degradação e desertificação, representa uma ameaça significativa aos meios de subsistência no Semiárido.

4. Conclusão

Os resultados obtidos com a aplicação do NDVI ADIVA na área de caatinga foram condizentes aos encontrados na literatura para a mesma região. O ADIVA revelou-se uma ferramenta de suma importância para a análise da cobertura vegetal em áreas semiáridas. Sua facilidade de processamento e a rapidez na obtenção de resultados possibilita a realização de estudos mais aprofundados e análises mais precisas na área em questão.

Diante dos resultados apresentados e analisados ao longo de um período de 10 anos, torna-se evidente que a cobertura vegetal no município de Floresta foi alterada devido à influência de fatores tanto antropogênicos quanto naturais. Nesse contexto, estratégias de uso sustentável e conservação dos recursos florestais assumem importância crucial, especialmente à luz das projeções relacionadas às mudanças climáticas globais, as quais devem agravar ainda mais as problemáticas existentes na região semiárida.

Com a crescente preocupação em relação aos efeitos das mudanças climáticas e à degradação ambiental nas regiões semiáridas, o monitoramento da cobertura vegetal pode desempenhar um papel fundamental na tomada de decisões e na promoção de uma gestão que vise à conservação da vegetação nativa, alinhada com as metas e indicadores dos Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS), ODS6- Água potável e saneamento; ODS13- Ação contra a mudança global do clima; e ODS15- Vida terrestre.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), pelo incentivo à pesquisa. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsas. Ao Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento pela disponibilização de infraestrutura necessária para realização do trabalho.

Referências

- Allen, R.; Tasumi, M.; Trezza, R., 2002. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) - Advanced Training and Users Manual - Idaho Implementation, v. 1.
- Araújo Filho, J. C.; da Silva, A. B.; Silva, F. B. R.; Leite, A. P., 2001. Diagnóstico ambiental do Município de Floresta, Pernambuco. EMBRAPA Solos, Rio de Janeiro.
- Araujo Filho, J. C., 2011. Relação solo e paisagem no Bioma Caatinga.
- Barbosa, H. A.; Kumar, T.V. L.; Paredes, F.; Elliott, S.; Ayuga, J. G., 2019. Assessment of Caatinga response to drought using Meteosat-SEVIRI normalized difference vegetation

- index (2008–2016). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 148, p. 235-252.
- Bastiaanssen, W. G. M.; Pelgrum, H.; Wang, J.; Ma, Y.; Moreno, J. F. Roenink, G. J. Van Der Wal, T., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. *Journal of Hydrology*, p. 214 - 229.
- Bezerra, A. C.; Silva, J. L. B.; Silva, D. A. O.; Batista, P. H. D.; Pinheiro, L. C.; Lopes, P. M. O.; Moura, G. B. A. Monitoramento Espaço-Temporal da Detecção de Mudanças em Vegetação de Caatinga por Sensoriamento Remoto no Semiárido Brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 01, p. 286-301, 2020. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.1.p286-301>.
- Beltrão, B. A., Mascarenhas, J. D. C., Miranda, J. L. F. D., Souza Junior, L. C. D., Galvão, M. J. D. T. G., & Pereira, S. N., 2005. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea, estado de Pernambuco: relatório diagnóstico do município de Floresta. CPRM.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente., 2017. Planaveg: Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa / Ministério do Meio Ambiente, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério da Educação. – Brasília, MMA.
- Castro, C. N., 2011. Impactos do projeto de transposição do Rio São Francisco na agricultura irrigada no nordeste setentrional. Rio de Janeiro, IPEA-Texto para discussão.
- Castro, C. N. D., Cerezini, M. T., 2022. O Projeto de integração do Rio São Francisco, obras complementares para o aumento da oferta hídrica e convivência com as secas. IPEA, Rio de Janeiro.
- Correia, R. C.; Kiill, L. H. P.; Moura, M. S. B.; Cunha, T. J. F.; Alves de Jesus Júnior, L.; Araújo, J. L. P., 2011. A região semiárida brasileira. in: VOLTOLINI, T. V. Produção de caprinos e ovinos no semiárido. Petrolina, Embrapa Semiárido, p. 21-48.
- Cunha, A. P. M. Do A.; Alvalá, R. C. Dos S.; Oliveira, G. S. de., 2013. Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 28, p. 139-152.
- Cunha, J. E. De B. L.; Rufino, I. A. A.; Silva, B. B.; Chaves, I. de B., 2012. Dinâmica da cobertura vegetal para a Bacia de São João do Rio do Peixe, PB, utilizando-se sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, p. 539-548.
- França, L. M. A.; Oliveira, T. H.; Pereira, J. A. Dos S.; Lins, T. M. P.; Galvêncio, J. D., 2013. Spatial analysis of caatinga vegetation in the municipality of Ibimirim-PE. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v.03, n.03, p. 059 –70.
- Francisco, P. R. M.; Chaves, I. B.; Chaves, L. H. G.; Lima, E. R. V., 2012. Detecção de Mudança da Vegetação de Caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.05, n.06, p. 1473-1487. DOI: doi.org/10.26848/rbgf.v5i6.232834.
- Galvêncio, J. D.; Pereira, J. A. dos S.; de Aquino França, L. M.; Lins, T. M. P., 2016. Análise da Variação da Vegetação dos Períodos Secos e Chuvosos Através de SAVI e Albedo de Superfície no Município De Belo Jardim - PE. REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA, Fortaleza, v. 10, n. 2.
- Galvêncio, J., Miranda, R. Q. de, De Moura, M. S. B., Montenegro, S. M. G., 2022. ADIVA - Análise de Índice de Vegetação e Água: Nota científica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 03, p. 1654-1659.
- Galvêncio, J. D.; Souza, W. M. de., 2022. Spatial and temporal evaluation of water availability in vegetation in the Terra Nova-PE basin, using ADIVA. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*. V 12, n.6, p. 418-435.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023. Censo Demográfico 2022: população e domicílios: primeiros resultados / IBGE, Coordenação Técnica do Censo Demográfico. IBGE, Rio de Janeiro.
- IPCC, 2023. Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: [10.59327/IPCC/AR6-9789291691647](https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647).
- Jensen, J. R., 2009. Sensoriamento remoto do ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos, Parêntese.
- Lacerda, F. F.; Dias, H.; Assad, E. D.; Santos, A. A.; da Silva, A. S. G., 2009. Detecção de sinais de mudanças climáticas para algumas

- localidades do sertão do Pajeú-PE. *in*: Anais do XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia.
- Leivas, J. F.; Takemura, C. M.; Teixeira, A. H. C.; Garçon, E. A. M., 2022. Análise da dinâmica temporal de índices de vegetação NDVI, EVI, SAVI e IRECI através de imagens Sentinel-2a e MODIS. *in*: Melo, J. O. F. (Org.). Ciências agrárias: o avanço da ciência no Brasil. São Paulo, Editora Científica Digital, v 4. DOI: 10.37885/220709585.
- Luz, G. G.; Galvêncio, J. D., 2023. Dinâmica do Uso do Solo, Balanço hídrico e NDVI no município de Floresta, Pernambuco, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v 16, p. 2898-2909.
- MAPBIOMAS. Mapeamento anual de cobertura e uso da terra no Brasil entre 1985 a 2022 – Coleção 8, Acesso em: 09 de outubro de 2023, através do link: brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2023/09/FACT_port-versao-final.pdf.
- Marengo, J. A.; Cunha, A. P.; Alves, L. M. A., 2016. seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. *Revista Climanalise*, 3, 49-54.
- Markham, B.L., Barker, J.L., 1987. Thematic Mapper Bandpass Solar Exoatmospherical Radiances. *International Journal of Remote Sensing*, n. 8, 517-523.
- MDR. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional., 2023. O que é o PISF?. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/acesso-a-informacao/perguntas-frequentes/seguranca-hidrica/projeto-de-integracao-do-rio>.
- Melo, L. D. M., 2020. Mudanças na paisagem com a transposição do Rio São Francisco, no domínio Caatinga, Pernambuco. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Rural de Pernambuco.
- Moura, M. S. B.; Galvêncio, J. D.; Brito, L. T. L.; Souza, L. S. B.; Sá, I. I. S.; Silva, T. G. F., 2012. Clima e água de chuva no Semi-Árido brasileiro. In: Brito, L. T. L.; Moura, M. S. B.; Gama, G. F. B. (editores Técnicos). Potencialidades da água de chuva no Semi-Árido brasileiro. EMBRAPA Semiárido, Petrolina, p. 37-58.
- Oliveira, L. M. M. D.; Montenegro, S. M. G. L.; Antonino, A. C. D.; Silva, B. B. D.; Machado, C. C. C.; Galvêncio, J. D., 2012. Análise quantitativa de parâmetros biofísicos de bacia hidrográfica obtidos por sensoriamento remoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47, 1209-1217.
- Ribeiro, E. P.; Nobrega, R. S.; Mota Filho, F. De O.; Moreira, E. B. M., 2016. Estimativa dos índices de vegetação na detecção de mudanças ambientais na bacia hidrográfica do rio Pajeú. *Geosul*, 31, 59-92.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. And Deering, D.W., 1974. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS-1 Symposium NASA, NASA SP-351, Washington DC, p. 309 – 317.
- Santos, T. O. dos., 2023. Índice de área foliar e validação do sistema de unidade de resposta hidrológica para Pernambuco (SUPer) em uma bacia hidrográfica do semiárido. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- Santos, T. O. Dos; Silveira, N. T.; Tibúrcio, I. M.; Galvêncio, J. D.; Pimentel, R. M., 2023. Detecção de fitoplâncton através do Índice de Área Foliar (IAF) e drone em um reservatório do semiárido. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 8, 204-211.
- Silva, K S. T.; Almeida, A. M.; Silva, T. S. F., 2017. influência de determinantes ambientais na vegetação da Caatinga. *Sociedade e Território*. 29, 183 - 198.
- Silva, J. M. D., Gurgel, I. G. D., Santos, M. O. D., Gurgel, A. D. M., Augusto, L. G. D. S., & Costa, A. M., 2015. Conflitos ambientais e as águas do rio São Francisco. *Saúde e Sociedade*, 24, 1208-1216.
- Silva, J. L. B.; Moura, G. B. de A.; da Silva, M. V.; Lopes, P. M. O.; Guedes, R. V. de S.; Silva, E. F. de F.; Ortiz, P. F. S.; Rodrigues, J. A de M. R., 2020. Changes in the water resources, soil use and spatial dynamics of Caatinga vegetation cover over semiarid region of the Brazilian Northeast. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 20, 100372. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100372>.
- Silva, L. G.; Galvêncio, J. D., 2013. Análise Comparativa da Variação nos Índices NDVI e SAVI no Sítio PELD-22, em Petrolina-PE, na Primeira Década do Século XXI. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 5, 1446-1456.

- Silva, E. A.; Ferreira, R. L. C.; da Silva, J. A. A.; Sá, I. B.; Duarte, S. M. A., 2013. Dinâmica do uso e cobertura da terra do município de Floresta, PE. Floresta, 43, 611-620.
- Silva, B. B. da.; Lopes, G. M.; Azevedo, P. V, 2005. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 - TM. Revista Brasileira de Meteorologia, 243 - 252, 2005.
- Silveira, N. T., Dos Santos, T. O., Tibúrcio, I. M., Galvêncio, J. D., 2022. Aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para a análise espaço-temporal da Bacia Hidrográfica do rio Terra Nova, Pernambuco, Brasil. Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto, 3.