



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Monitoramento da Captação de CO₂ pela Vegetação Paraibana: Uma Abordagem Utilizando Sensoriamento Remoto

Rebeca Alves Neves¹, Célia Campos Braga², Mônica Paulino de Andrade³, Dimas de Barros Santiago⁴, Geisse Kelly Soares Nery Pontes⁵, Edivan Silva dos Santos⁶

¹Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Campina Grande, PB, Brasil. E-mail: rebeca.neves@estudante.ufcg.edu.br (<https://orcid.org/0009-0008-6048-228X>).

²Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Campina Grande, PB, Brasil. E-mail: celiadca@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-6383-3112>).

³Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Campina Grande, PB, Brasil. E-mail: monicapaulinodeandrade@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0009-1939-8382>).

⁴Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Campina Grande, PB, Brasil. E-mail: dimas.barros91@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-7118-8467>).

⁵Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Campina Grande, PB, Brasil. E-mail: nerygeisse@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0006-6799-9746>).

⁶Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Campina Grande, PB, Brasil. E-mail: edivan.silva@estudante.ufcg.edu.br.

Artigo recebido em 04/01/2025 e aceito em 03/12/2025

RESUMO

Neste estudo avaliou-se a variabilidade sazonal e anual da Produtividade Primária Bruta (GPP) e do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no estado da Paraíba, Brasil, entre 2003 e 2022, utilizando dados MODIS/Terra e ERA5. Foram analisadas seis regiões pluviometricamente homogêneas, com base em registros de 102 estações meteorológicas. A precipitação anual variou de menos de 500 mm nas áreas mais áridas (Cariri/Curimataú) a mais de 1.600 mm no Litoral. Já o NDVI médio anual, foi superior a 0,6 no Litoral e Brejo, e entre 0,2–0,5 nas regiões semiáridas, evidenciando menor vigor e estabilidade da vegetação. A GPP média mensal atingiu valores próximos de 200 gC/m²/mês nas áreas úmidas, enquanto no Sertão e Cariri/Curimataú os valores foram substancialmente menores, acompanhando a limitação hídrica. Sazonalmente, o Sertão e Alto Sertão registraram no verão totais médios de precipitação entre 80–200 mm, com picos de GPP e NDVI no outono. No Cariri/Curimataú, as chuvas variaram de 40–100 mm, com resposta rápida porém menos duradoura da vegetação. O Litoral manteve NDVI elevado durante todo o ano, enquanto o Agreste apresentou comportamento intermediário, com GPP mais alta logo após as primeiras chuvas. Fenômenos climáticos como El Niño reduziram a pluviosidade e a GPP nas regiões semiáridas, enquanto La Niña aumentou a disponibilidade hídrica. Conclui-se que Litoral e Brejo possuem maior estabilidade na cobertura vegetal e capacidade de sequestro de carbono, enquanto Sertão e Cariri/Curimataú são mais vulneráveis à variabilidade climática. O monitoramento contínuo de NDVI e GPP é essencial para políticas de conservação e mitigação das emissões de carbono.

Palavras-chave: Dióxido de carbono (CO₂); Sensoriamento Remoto; Produtividade Primária Bruta (GPP); Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

Monitoring of CO₂ Uptake by Paraíba's Vegetation: An Approach Using Remote Sensing

ABSTRACT

The study assessed the seasonal and annual variability of Gross Primary Productivity (GPP) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the state of Paraíba, Brazil, from 2003 to 2022, using MODIS/Terra and ERA5

data. Six pluviometrically homogeneous regions were analyzed based on records from 102 meteorological stations. Annual rainfall ranged from less than 500 mm in the driest areas (Cariri/Curimataú) to over 1,600 mm in the coastal zone. The mean annual NDVI exceeded 0.6 in the Litoral and Brejo regions, while semi-arid areas showed values between 0.2–0.5, indicating lower vegetation vigor and stability. Average monthly GPP reached approximately 200 gC/m²/month in humid zones, whereas in the Sertão and Cariri/Curimataú, values were substantially lower, reflecting water limitations. Seasonally, the Sertão and Alto Sertão recorded summer rainfall totals between 80–200 mm, with GPP and NDVI peaks in autumn. In Cariri/Curimataú, rainfall ranged from 40–100 mm, with a fast but short-lived vegetation response. The Litoral maintained high NDVI year-round, while the Agreste displayed intermediate behavior, with GPP peaking shortly after the first rains. Climate phenomena such as El Niño reduced rainfall and GPP in semi-arid regions, while La Niña increased water availability. It is concluded that Litoral and Brejo present greater vegetation stability and carbon sequestration capacity, whereas Sertão and Cariri/Curimataú are more vulnerable to climate variability. Continuous monitoring of NDVI and GPP, combined with climatic analysis, is essential to support land-use sustainability policies, natural resource conservation, and carbon emission mitigation strategies.

Keywords: Carbon Dioxide (CO₂); Remote Sensing; Gross Primary Productivity (GPP); Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

Introdução

O fluxo de carbono refere-se ao movimento do carbono entre a atmosfera, oceanos, biosfera e a geosfera, o qual desempenha um papel crucial na regulação do clima da Terra. O estudo dos fenômenos atmosféricos e climáticos está profundamente interligado com o ciclo do carbono. Processos como a fotossíntese, a respiração, a decomposição e a dissolução de dióxido de carbono (CO₂) nos oceanos e vegetação influenciam diretamente as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera (Lopes, 2023).

Nos últimos tempos, os níveis de CO₂ atmosférico vêm aumentando gradativamente devido, principalmente, ao aumento da queima de combustíveis fósseis, ao desmatamento provocado pelo fogo, a mudanças no uso da terra e a fatores meteorológicos (Chien et al., 2018; IPCC, 2021). A alta variabilidade temporal e espacial do balanço do CO₂, os efeitos dos aerossóis no fluxo do CO₂ entre a vegetação e atmosfera e as consequentes trocas de energia têm sido uma preocupação geral da comunidade científica mundial (Xie et al., 2020; Braghiere et al., 2020; IPCC, 2021). Esses gases, por sua vez, impactam o clima global, alterando padrões de temperatura, precipitação e eventos climáticos extremos (Oliveira, 2023).

A nível regional destacam-se os trabalhos realizados por Gomes et al. (2019); De Oliveira et al. (2021), para a região Amazônica brasileira, assim como Moraes et al. (2017), Silva (2018) e

Mendes et al. (2020) para o Cerrado e Caatinga na região Semiárido do Nordeste do Brasil. Neste sentido, compreender e avaliar o comportamento e a quantidade de carbono capturada da atmosfera a partir da Produtividade Primária Bruta - GPP espacialmente em uma determinada região é de extrema importância para a saúde dos ecossistemas. Sabe-se que esse processo transforma CO₂ e luz solar em biomassa, que é essencial para o crescimento das plantas e para a formação de novos tecidos vegetais (Bolson, 2023).

Ecossistemas com alta GPP, como florestas e padeiras, atuam como sumidouros de carbono, absorvendo mais CO₂ da atmosfera do que liberam. Isso ajuda a reduzir as concentrações de CO₂ atmosférico e mitigar o aquecimento global (Borges, 2024). Oliveira et al. (2021) investigaram os efeitos da degradação da Caatinga sobre as trocas de água e carbono no Semiárido brasileiro. Os autores concluíram que os diferentes tipos de degradação podem reduzir a capacidade de bioma para absorver o CO₂ modificando o microclima regional.

A determinação da GPP efetiva-se por diferentes técnicas, destacando o método de grande repercussão científica de Eddy Covariance, instalados em torres micrometeorológicas, porém de elevado custo operacional com algumas restrições relacionadas a dimensão e homogeneidade de instalação. Uma alternativa de baixo custo operacional seria o Sensoriamento

Remoto, onde a GPP pode ser estimada pelo método de Monteith (1972) que envolve a relação entre a eficiência de uso da luz (ϵ) e a radiação Fotossinteticamente ativa, absorvida pela vegetação (RFAA), a qual pode ser estimada a partir de índices de vegetação, usando dados dos produtos do Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS/Terra), e do ECMWF Reanalysis 5th Generation (ERA5). Assim como também a GPP será obtida através da plataforma Google Earth Engine (GEE) que computa e estima por meio da coleção MOD17A1 do sensor e comparada com a estimada pelo método Monteith (1972).

Estudos sobre a GPP via sensor MODIS (MOD17A1), vem sendo discutido ao longo dos anos por diversos autores. Alguns trabalhos como os de Cabral et al. (2011), Braga (2013), Silva (2024), Ivo (2024), Santana et al. (2025), mostram a eficácia do sensoriamento remoto para o estudo da GPP, já que a região semiárida, em especial, é marcada por sazonalidade acentuada, vegetação adaptada as condições hídricas limitadas e crescente pressão antrópica, como desmatamento, expansão agrícola e degradação dos recursos naturais (Celis et al., 2023; Castro et al., 2024). Compreender a dinâmica da GPP na Paraíba é fundamental para avaliar a resiliência dos ecossistemas frente às mudanças climáticas, além de subsidiar políticas públicas voltadas à conservação ambiental, uso sustentável da terra e mitigação das emissões de carbono. Dessa forma, o estudo nessa área contribui não apenas

para o avanço científico regional, mas também para a construção de estratégias eficazes de gestão ambiental no contexto das regiões semiáridas brasileiras. Levando em consideração os indicadores analíticos anteriores, bem como a potencialidade e importância que é estudar a captura de CO₂ da atmosfera, o propósito deste estudo é avaliar a variabilidade sazonal e anual da GPP em diferentes regiões homogêneas da precipitação no estado da Paraíba, utilizando dados dos produtos MODIS/terra e do ERA5.

Material e Métodos

Área de estudo

O presente estudo foi feito para o estado da Paraíba, localizado na região Nordeste do Brasil, entre as latitudes aproximadas de 6°30' e 8°30' S e longitudes de 34°45' e 38°45' W (Figura 1). Sua altimetria varia de 1 até cerca de 1.100 metros acima do nível do mar. Conforme a classificação de Brito e Braga (2005), a Paraíba foi subdividida em seis regiões pluviométricamente homogêneas a saber: Litoral (1), Brejo (2), Agreste (3), Cariri/Curimataú (4), Sertão (5) e Alto Sertão (6).

A variação de relevo influencia diretamente os padrões climáticos e a dinâmica dos ecossistemas locais. Além de cada uma dessas regiões possui características fisiográficas, climáticas e de uso e cobertura da terra distintas.

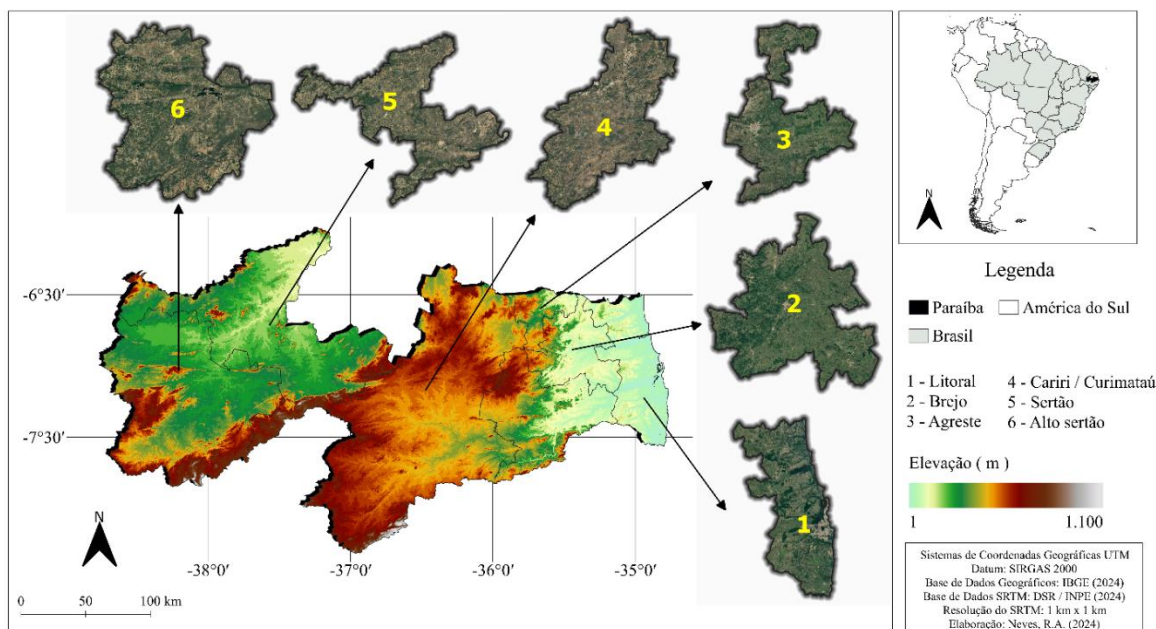


Figura 1: Mapa do Brasil destacando as regiões pluviométricamente Homogêneas do estado da Paraíba. Fonte: BRITO e BRAGA, 2005 (adaptado pelos Autores, 2024).

A Paraíba, localizada no Nordeste do Brasil, possui uma área de 56.340,9 km² e dividida em seis regiões homogêneas: Litoral, Brejo, Agreste, Cariri/Curimataú, Alto sertão e Sertão (Silva, 2022). O estado apresenta dois regimes de chuvas: fevereiro a maio - Chuvas no Alto Sertão, Sertão e Cariri/Curimataú, influenciadas pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e abril a julho - Chuvas no Agreste, Brejo e Litoral, influenciadas pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e ventos alísios (Molion & Bernardo, 2000; Souza et. al, 2022; Medeiros, 2024). A representação da climatologia pode ser observada na Figura 3.

As variações climáticas e as anomalias na temperatura do oceano Atlântico, como El Niño e La Niña, afetam a distribuição de chuvas, impactando diretamente vários fatores. No Sertão, a irregularidade das chuvas desafia a agricultura de sequeiro, enquanto no Brejo há condições mais favoráveis para uma variedade maior de cultivos. Estudos meteorológicos e estratégias de adaptação

são fundamentais para a resiliência das comunidades locais e o desenvolvimento sustentável (Francisco & Santos, 2017).

Dados

Neste estudo foram selecionadas 102 estações/postos meteorológicas (Figura 2), bem distribuídas no Estado para o período de 2003 a 2022, perfazendo um total de 20 anos. Os dados foram cedidos pela AESA (2024). Os dados Índices de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foram obtidos do produto MODIS. Para a determinação da variabilidade espacial / temporal da GPP, foram utilizados dados do MODIS e do ERA5 a partir da plataforma do Google Earth Engine (GEE) - (GEE, 2017).

Os pontos da GPP e NDVI obtidos do GEE coincidem com os pontos de estação/postos meteorológicos distribuídos espacialmente no estado da Paraíba.

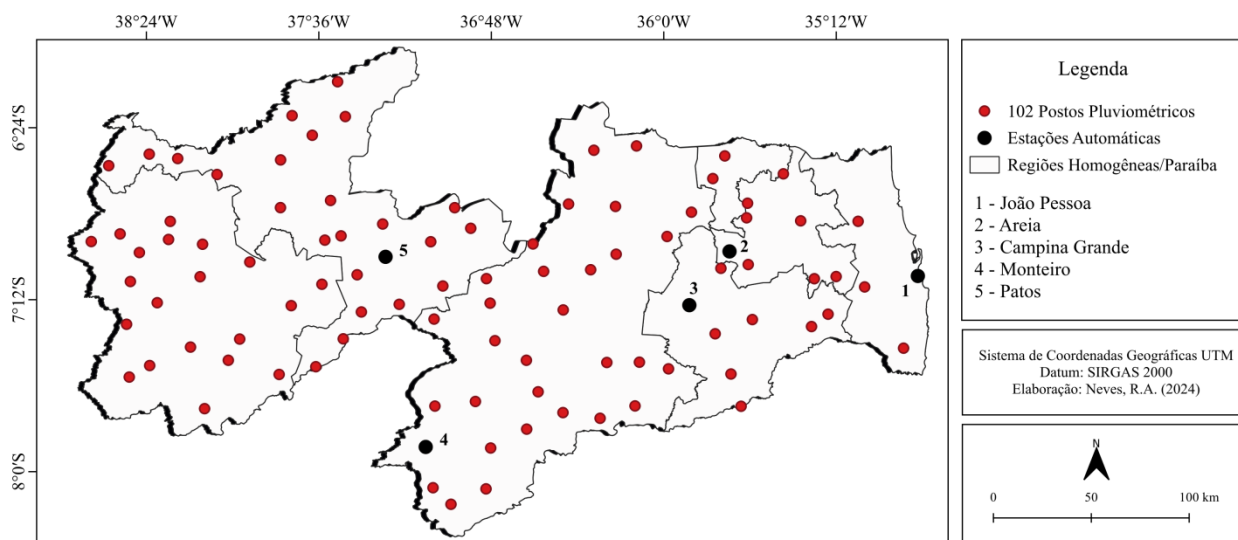


Figura 2: Espacialização dos 102 postos /estações meteorológicas nas regiões homogêneas no estado da Paraíba. Fonte: (Autores, 2024)

A plataforma do GEE disponibiliza produtos de informações detalhadas sobre GPP e Fotossíntese Líquida (PSN). O MOD17A2 fornece valores acumulados de 8 dias com pixel de 500 metros (m), baseado no conceito de eficiência de uso de radiação. Os valores da banda PSN obtidos GPP subtraindo a Respiração de Manutenção (MR). O produto de dados também contém uma camada de Controle de Qualidade (QC) PSN. A camada de qualidade contém informações de qualidade para GPP e PSN (NASA EOSDIS, 2015). Outro produto disponibilizado pelo GEE, é o NDVI.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação Aprimorado (EVI) são obtidos do produto MOD13A1. Esses índices fornecem informações de cada pixel com resolução espacial de 500 metros (m). O algoritmo seleciona o melhor valor de pixel, considerando os critérios de baixa cobertura de nuvens, baixo ângulo de visão e maior valor de NDVI/EVI disponível durante o período de 16 dias. Além das camadas de vegetação, o MOD13A1 inclui camadas de garantia de qualidade (GQ) e bandas de refletância 1 (vermelho), 2 (infravermelho próximo), 3 (azul) e 7 (infravermelho médio), juntamente com quatro camadas adicionais de observação (LP DAAC/NASA, 2015). O Fluxo de calor latente-LE e o fluxo de calor sensível-H foram obtidos do

ERA5-Land Daily Aggregated - Reanálise Climática do ECMWF (Muñoz Sabater, 2019).

Metodologia

A seguir são descritos a metodologia aplicada na estimativa da GPP utilizando os dados dos 102 postos pluviométricos e interpolação dos dados pontuais para a geração dos mapas dos totais médios de precipitação no período estudado. Posteriormente, deu-se sequência aos cálculos da GPP.

A estimativa da GPP foi obtida a partir do modelo proposto por Monteith (1972), onde o cálculo da GPP envolve a eficiência de uso da luz (ϵ), radiação Fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação (RFAA), índices de vegetação, usando dados dos produtos MODIS/terra, ERA5, dada pela expressão:

$$GPP = RFAA \times \epsilon \text{ (gC/m}^2\text{)} \quad (1)$$

Em que, a RFAA é a Radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação (W/m^2); ϵ , Eficiência do uso da luz da vegetação.

A RFAA é obtida em função do NDVI e da Radiação Fotossinteticamente Ativa - RFA, proposta por Daughtry *et al.* (1995) dada por:

$$RFAA = RFA \times (-0,1611,257 \times NDVI) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2)$$

A fração da Radiação Fotossinteticamente ativa absorvida (RFAA) - RFA é estimada a partir radiação solar global diária, proposto por Bastiaanssen e Ali (2003) dada pela expressão:

$$RFA = 0,48 \times R_{s24h\downarrow} (W/m^2) \quad (3)$$

onde $R_{s24h\downarrow}$ a radiação solar de onda curta incidente no período de 24 horas.

Para determinação da eficiência- ϵ do uso da luz utilizou-se a equação de Field *et al.* (1995), modificado por Bastiaanssen e Ali (2003):

$$\epsilon = \epsilon' \times T_1 \times T_2 \times \Lambda \text{ (gC/m}^2\text{)} \quad (4)$$

ϵ' : eficiência máxima de uso da luz pela vegetação igual a 1,8 gC/MJ segundo Ibrahim (2006), T_1 e T_2 : contribuição da temperatura na eficiência de uso da luz pelas plantas, Λ : Fração evaporativa

As temperaturas utilizadas na equação anterior foram calculadas por:

$$T_1 = 0,8 + 0,02T_{opt} - 0,0005T_{opt}^2 \quad (5)$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + \exp(0,2T_{opt} - 10 - T_{dia})} \times \frac{1}{1 + \exp[0,3(-T_{opt} - 10 + T_{dia})]} \quad (6)$$

T_{opt} : temperatura média do ar (°C) do mês de máximo NDVI

T_{dia} : temperatura média diária do ar (°C).

No SEBAL se obtém a densidade do fluxo de calor latente - LE (W/m^2) como resíduo do balanço de energia à superfície, qual seja:

$$LE = R_n - G - H \quad (7)$$

em que R_n (W/m^2) é o saldo de radiação, G (W/m^2) é a densidade do fluxo de calor no solo e

H (W/m^2) é a densidade do fluxo de calor sensível. Shuttleworth *et al.* (1989) conduziram os primeiros estudos que sugeriam que a fração evaporativa da vegetação em pradarias, é um indicador relativamente constante na partição de energia ao longo do dia. Essa observação corrobora com os encontrados e apresentados por Brutsaert & Sugita (1992). Logo a fração evaporativa- Λ pode ser obtida pela a razão entre os fluxos de calor latente e a soma deste com o fluxo de calor sensível, dado pela seguinte expressão:

$$\Lambda = \frac{LE}{R_n - G} = \frac{LE}{LE + H} \quad (8)$$

Em que: LE é o fluxo de calor latente, R_n é o saldo de radiação, H é o fluxo de calor sensível, e G é o fluxo de calor no solo.

A Fração evaporativa Λ representa a contribuição do elemento água na fotossíntese e pode ser determinada com base no balanço de energia segundo o SEBAL (Bastiaanssen *et al.*, 1998; Silva & Bezerra, 2006; Allen *et al.*, 2007; Bezerra *et al.*, 2008, 2010;).

Resultados E Discussão

Climatologia do Estado da Paraíba

A Figura .3 expõe a distribuição espacial e temporal dos totais médios anuais da precipitação no estado da Paraíba no período de 2003 a 2022. A variabilidade da precipitação no estado está intimamente relacionada com a atuação de diversos sistemas meteorológicos que atuam na região em diferentes escalas de tempo, assim como sua orografia. Os maiores índices pluviométricos superiores a 1600 mm são encontrados na região leste, enquanto os menores em determinadas localidades, mais semiáridas (região central) são inferiores a 500mm anuais.

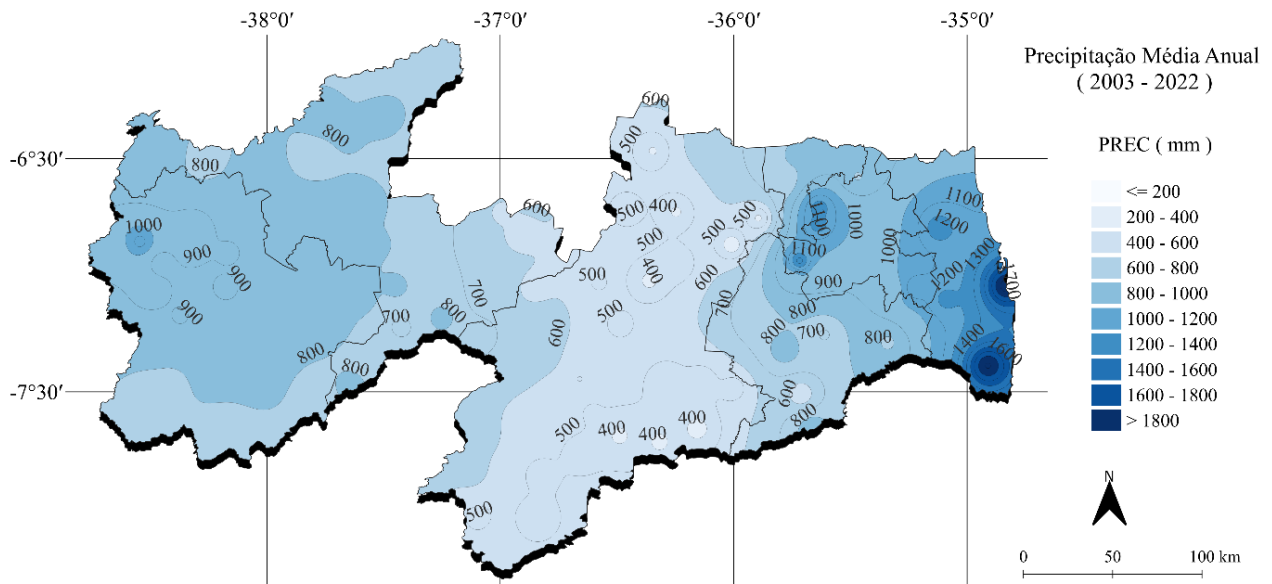


Figura 3: Totais médios anuais de precipitação no período de 2003 até 2022. Fonte: (Autores, 2024).

Média anual do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

No período de 2003 a 2022 a análise média da variabilidade espacial anual do NDVI mostra informações importantes sobre a cobertura vegetal e a resposta dos ecossistemas às condições climáticas ao longo desses anos, refletindo o impacto nas estações chuvosa e seca. Em regiões semiáridas, como o Sertão e o Cariri/Curimataú da Paraíba, o NDVI tende a ter um declínio acentuado. Nas regiões do Litoral e Brejo a variável apresenta-se mais estável e elevado, devido à maior disponibilidade hídrica e densidade e tipo de cobertura vegetal, conforme ilustrado na figura 4.

O NDVI reflete a vigor da vegetação e sua capacidade de recuperação. Áreas com declínio persistente do índice podem estar enfrentando degradação ambiental e risco de desertificação (Lima et al., 2023), a exemplo da região central do

estado com índice de vegetação frequentemente baixo, variando entre 0,2 a 0,5.

Estudos envolvendo tipos de cobertura da vegetação, mostram que o comportamento do NDVI é uma variável essencial para se avaliar a resiliência dos ecossistemas diante de eventos climáticos extremos, no intuito de implementar estratégias de manejo sustentável (de Bozzano et al., 2022; Sousa, 2024). O comportamento médio anual do NDVI no período estudado destaca a vulnerabilidade das regiões semiáridas, a exemplo do Cariri/Curimataú e Sertão, propiciado pela variabilidade climática. Essa análise contribui para o entendimento das dinâmicas ecológicas e para a formulação de políticas voltadas à conservação ambiental e à mitigação dos impactos das mudanças climáticas (DE BOZZANO RODRIGUES, 2024).

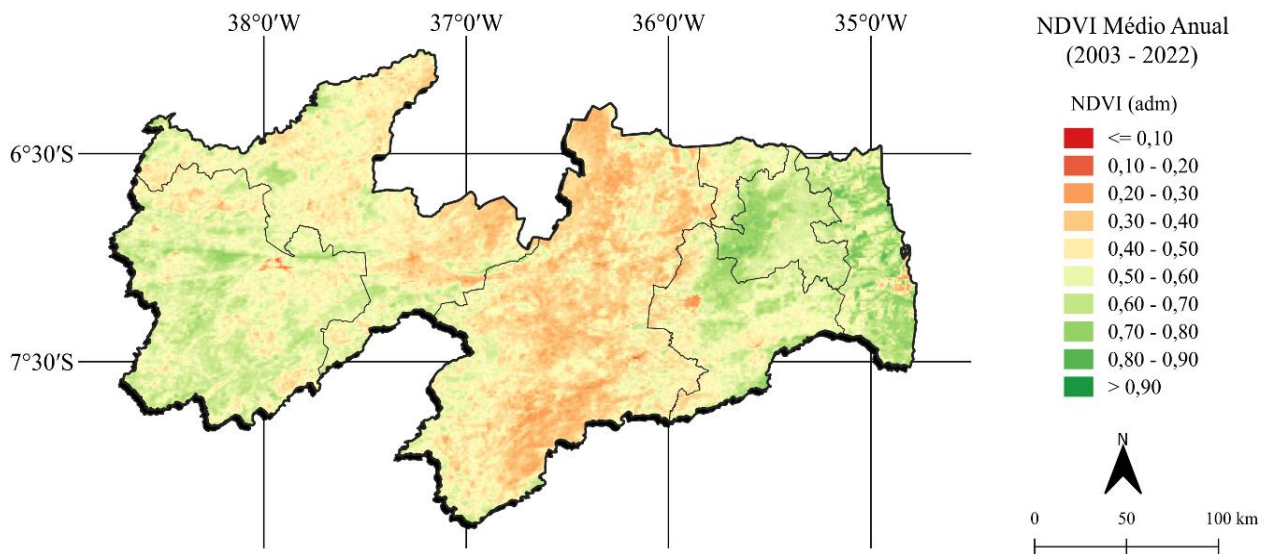


Figura 4: Média anual do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para o período de 2003 até 2022. Fonte: Autores, 2025.

Média anual da Produtividade Primária Bruta (GPP)

A Produtividade Primária Bruta (GPP) para o período de 2003 a 2022 mostra padrões regionais distintos, intimamente ligados às variações climáticas e aos regimes de precipitação das diferentes regiões do estado da Paraíba. Sabe-se que a GPP, representa a capacidade da vegetação de fixar carbono atmosférico através da fotossíntese, e, é influenciado principalmente pela disponibilidade de água, radiação solar e condições ambientais específicas indicando, que a mesma intimamente relacionada com a variabilidade das chuvas (da Silva, (2019), Silva, (2022)). Durante eventos de El Niño, a redução da pluviosidade em regiões semiáridas intensifica o declínio da GPP, enquanto em anos de La Niña, a maior

disponibilidade hídrica resulta em uma produtividade mais elevada (Carmo, 2022) conforme Figura 5.

O comportamento médio anual da GPP no período estudado demonstra a dependência direta da vegetação com a disponibilidade hídrica e as condições climáticas regionais. Em regiões semiáridas, como o Sertão e o Cariri/Curimataú, a curta estação chuvosa define os picos de produtividade, enquanto no Brejo e litoral, a GPP se mantém elevada devido a condições ambientais mais favoráveis. Essas dinâmicas reforçam a importância de estratégias de manejo sustentável e monitoramento contínuo para mitigar os impactos de variações climáticas no estado da Paraíba (Oliveira, 2023).

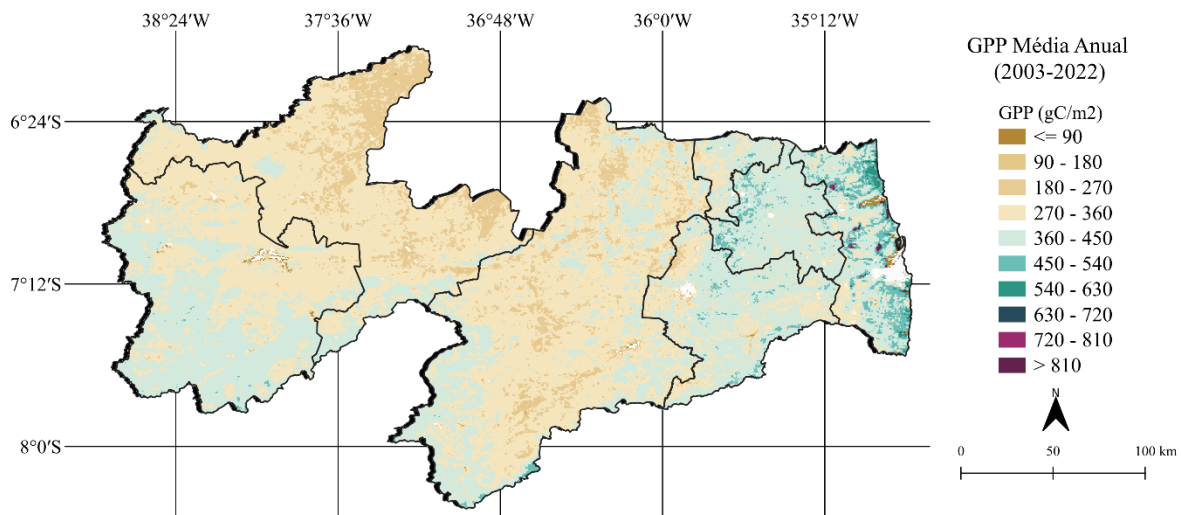


Figura 5: Média anual da Produtividade Primária Bruta (GPP) para o período de 2003 até 2022. Fonte: Autores, 2025.

Análise espacial e sazonal da PREC, GPP e NDVI

A seguir é mostrado e analisados os resultados obtidos da Produtividade Primária Bruta (GPP) e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) pela da Plataforma GEE e dados da precipitação observados no período de 2003 a 2022 para o estado da Paraíba. Estudos realizados por vários pesquisadores reportaram que as chuvas na região NEB, em especial nas regiões do Sertão e central são fortemente influenciadas pela atuação da ZCIT e VCANS. Tal como o estado da Paraíba, que possui um regime de chuvas irregular e sazonal, com acentuadas diferenças entre o Litoral mais úmido e o interior semiárido, especialmente região central e sertão, que sofre com a recorrência de secas prolongadas (Nimer, 1972; Hastenrath & Greishar, 1993; Molion & Bernado 2002; Braga et al., 2014, dentre outros).

A Figura 6, mostra a variabilidade sazonal da precipitação no verão. Observa-se que Sertão e Alto Sertão (oeste), apresenta totais médios sazonais entre 80 e 200 mm, com maior concentração de chuva no alto Sertão, marcando o pico das chuvas neste trimestre. Estudos como: Sousa & Moura, (2021); Araújo & Andrade, (2020), denotam que o regime de chuvas das referidas regiões é marcado por uma estação chuvosa curta e irregular, concentrada em fevereiro, e uma longa estação seca que domina o

restante do ano. Já a resposta da GPP (Produtividade Primária Bruta) é mais intensa e abrangente no trimestre seguinte, outono, (Figura 7), assim como o NDVI também reflete a influência positiva do período chuvoso, evoluindo com o aumento das chuvas ao longo das estações (Herrmann, 2022). Os valores mais altos de NDVI e GPP são registrados no Alto Sertão (RH6), indicando que existe uma forte relação entre a GPP e chuva. A irregularidade e a escassez de chuva predominam na região do Cariri/Curimataú tornando essa área vulnerável às secas, as quais são mais afetadas pela falta de chuvas (Ives & Nóbrega, 2021; Silva & Sousa, 2020; Silva & Oliveira, 2022). Estudo mostram que as chuvas na região Nordeste do Brasil são frequentemente influenciadas pelos fenômenos atmosféricos globais, como o El Niño e La Niña. Durante anos de El Niño, as chuvas tendem a ser ainda mais escassas, agravando a seca. Em anos de La Niña, as precipitações podem ser mais abundantes, embora ainda irregulares. Autores como Silva & Souza (2019); Santos & Carvalho (2020) e Nóbrega & Oliveira (2021) mostraram que durante esse período, as temperaturas podem ser bastante elevadas, e a umidade relativa do ar tende a ser muito baixa, caracterizando condições áridas. A estação chuvosa do Cariri e Curimataú ocorre,

geralmente, entre metade do verão estendendo-se até o outono, variam de 40 a 100 mm, conforme Figuras 6, 7 e 8, o pico de chuvas na região central (Cariri e Curimataú), conhecida como “zona de transição” ocorre entre verão e outono. A vegetação predominante do Cariri e Curimataú é a Caatinga arbustiva, composta por plantas de pequeno e médio porte, com uma densidade moderada. Esse tipo de vegetação é típico de regiões com baixa pluviosidade e solo pedregoso ou raso (Medeiros & Santos, 2019; Gonzalez, & Lima, 2020). O NDVI tem valores mais elevados respondendo a estação chuvosa da região, consequentemente GPP mais elevada (Figuras 7 e 8).

A região do Brejo paraibano, possui um regime de chuvas diferenciado em comparação com as demais áreas do estado, propiciado pela sua topografia de altitude elevada, assim como características ambientais particulares, devido o tipo de vegetação, solo, topografia, dentre outras. Ela está situada na zona dentro agreste e faz fronteira com a zona da mata. As chuvas nessa região são mais elevadas e regulares. Isso se deve, em parte, à elevação do terreno, que favorece a condensação da umidade, além da influência dos sistemas de leste, que trazem umidade do Oceano Atlântico e causam precipitações (Carvalho & Souza, 2022). O regime de chuvas da região também é influenciado por esses fenômenos globais como El Niño e La Niña (Barbosa, & Cavalcanti, 2019; Gomes, & Araújo, 2020). O Brejo possui uma vegetação mais densa e verde, em contraste com as áreas semiáridas do estado (Silva & Nóbrega, 2021). A Mata Atlântica que cobre partes da região ajuda a manter a umidade do solo e a suavizar as variações térmicas, logo o NDVI e a GPP respondem ao regime de chuvas, o que já é esperado. Figuras 7 a 9.

O Litoral da Paraíba é composto por diversos ecossistemas, como Mata Atlântica, manguezais, restingas e áreas de cocais, cada um com características específicas adaptadas às condições climáticas e geográficas locais (Lima & Nascimento, 2020; Santos & Silva, 2020; Pereira,

& Tabarelli, 2021; Moura, & Araújo, 2022). O regime de chuvas do Litoral da Paraíba é caracterizado por um padrão mais regular e intenso em comparação com as regiões mais interioranas do estado, como o Sertão e o Agreste (Brito e Braga 2005). A estação chuvosa no Litoral da Paraíba ocorre predominantemente entre o outono e inverno (Figuras 7 e 8). As chuvas do litoral são influenciadas sistemas atmosféricos de leste, tais como de ondas de leste, e brisas que trazem umidade do Oceano Atlântico (Ferreira, & Moura, 2021; Andrade, & Lima, 2022). Observa-se que o NDVI é bem expressivo durante todo o ano, pois as chuvas são mais regulares, proximidade do oceano, tipo de vegetação de grande porte, pois mesmo em períodos secos, ela retira umidade do solo, permanecendo verde praticamente o ano todo (Braga, 2000). A GPP acompanha o desenvolvimento da vegetação variando sazonalmente entre 100 a 200 ($\frac{gC}{m^2}$). O agreste é composto por vegetação do tipo Caatinga arbustiva, com algumas áreas de agricultura e pastagem. Esse tipo de vegetação tem uma resposta rápida às chuvas, mas a Produtividade Primária Bruta é relativamente limitada em comparação com ecossistemas mais úmidos, como o Brejo, Mata Atlântica. A vegetação Caatinga é adaptada à escassez de água e apresenta uma GPP e um NDVI sazonal, com valores mais elevados, logo após as primeiras chuvas como mostra nas Figuras 7 e 8. Uma rápida redução quando a água se torna limitada, tendo resposta ainda na primavera, figura 9 resultados do qual corrobora com estudos de Araújo & Silva, 2021; Medeiros, Souza & Lima, 2022. O agreste da Paraíba apresenta um clima de transição entre o Sertão semiárido e o Brejo mais úmido, reflete diretamente no comportamento do NDVI (Ferreira, & Almeida, 2023). Em síntese o estado da Paraíba o índice vegetação está fortemente associado com a estação chuvosa que é entre outono e inverno, com valores mais elevados e mais baixo na estação seca (primavera ao verão), atingindo valores próximo de zero.

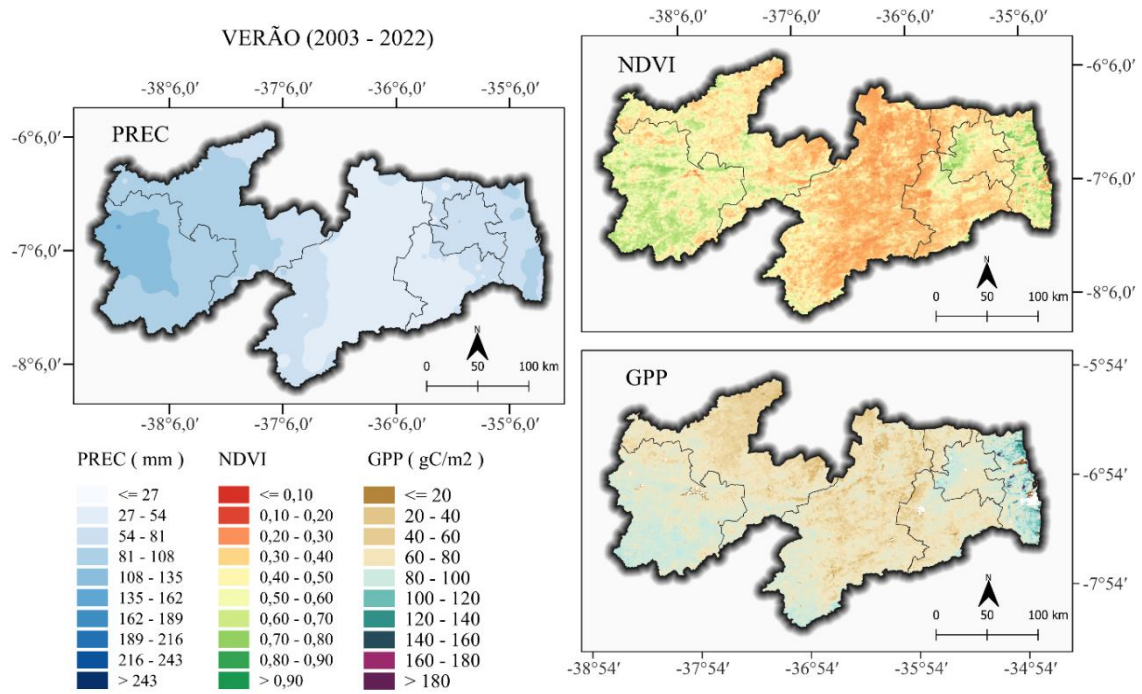


Figura 6: Média sazonal do verão para as variáveis de NDVI, GPP e PREC. Fonte: Autores, 2025.

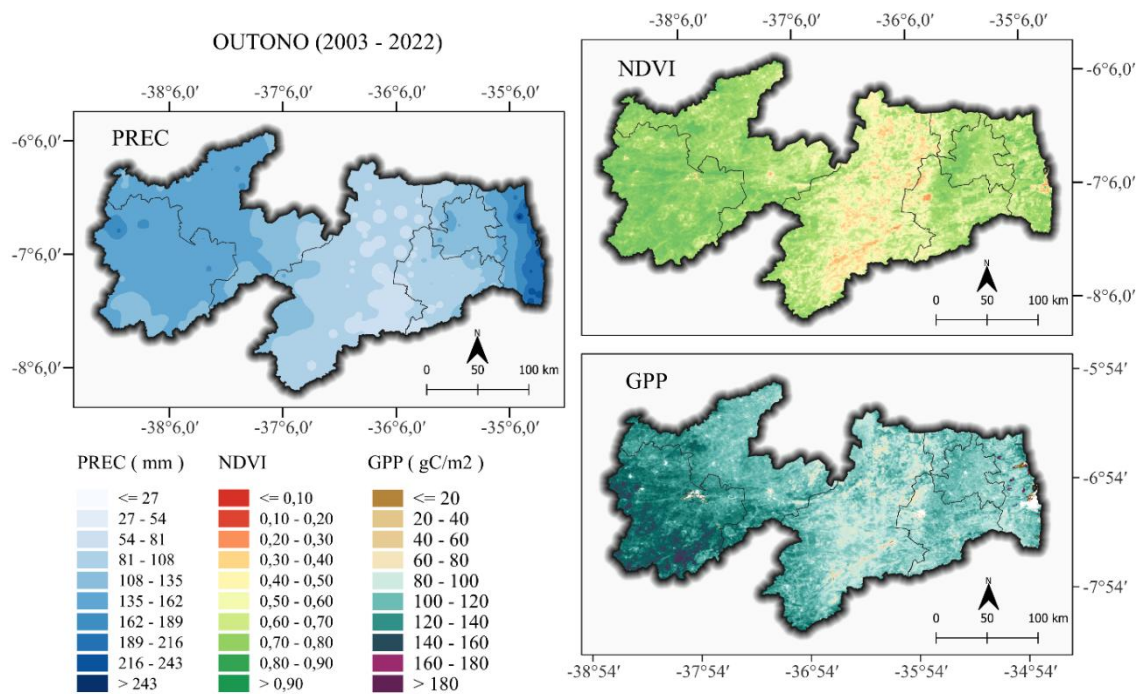


Figura 7: Média sazonal do outono para as variáveis de NDVI, GPP e PREC. Fonte: Autores, 2025.

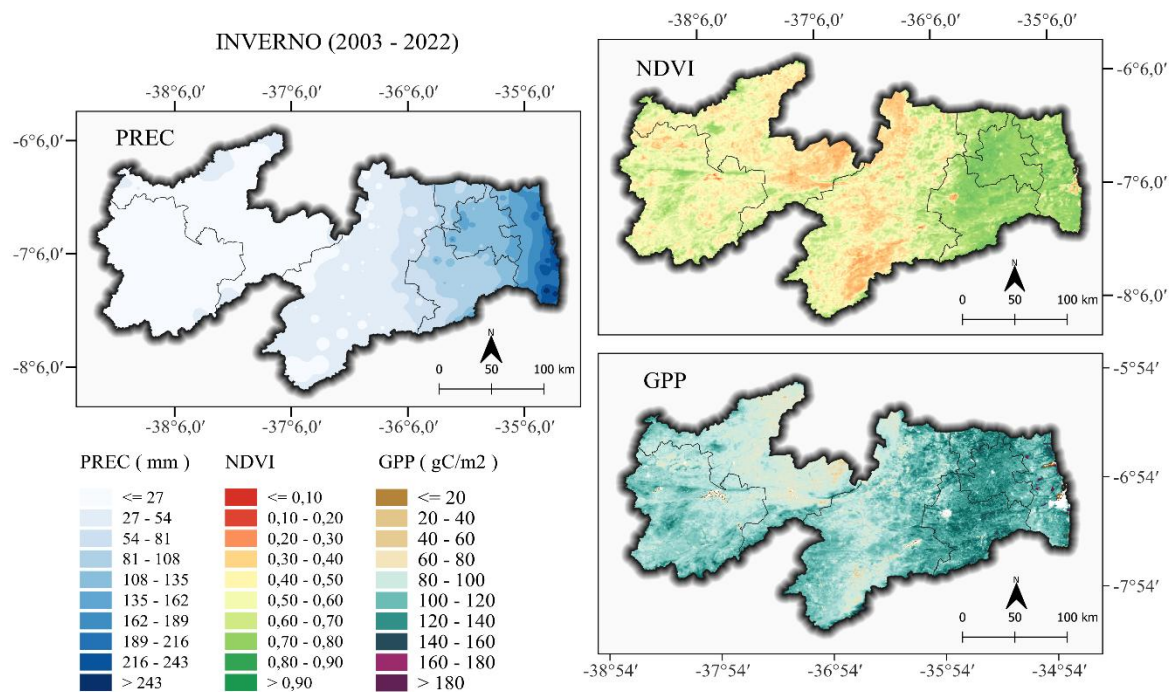


Figura 8: Média sazonal do inverno para as variáveis de NDVI, GPP e PREC. Fonte: Autores, 2025.

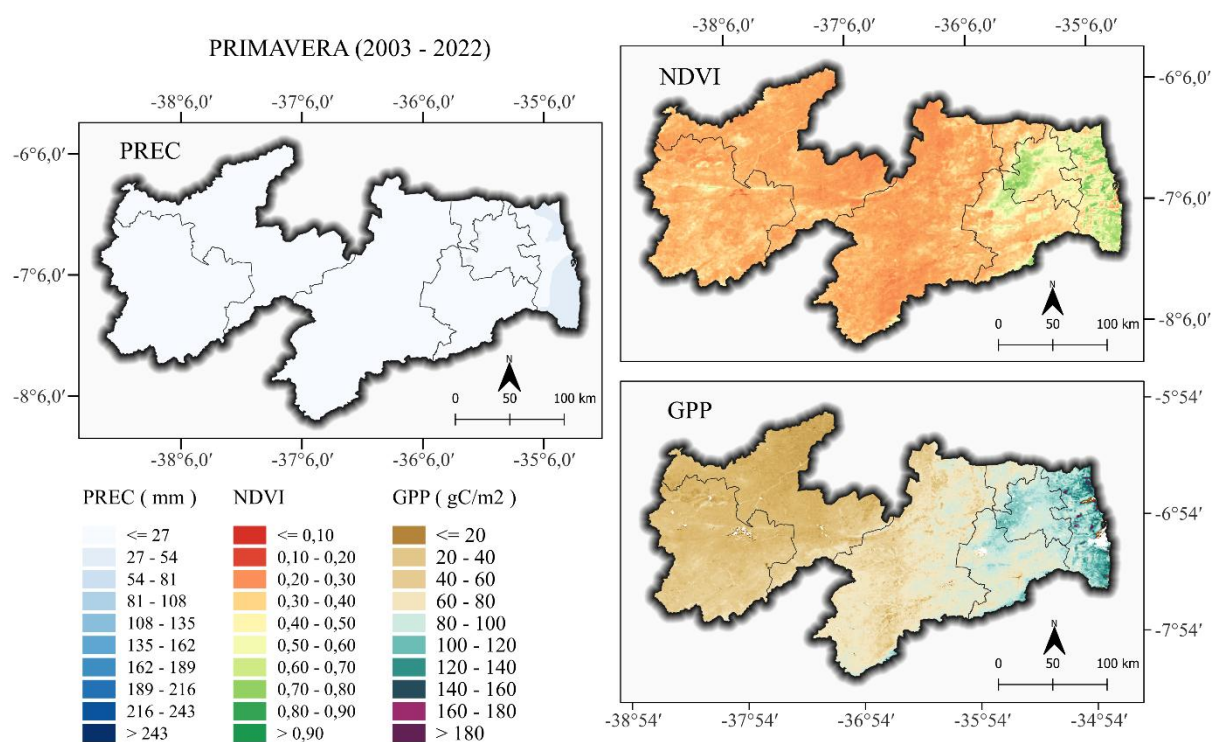


Figura 9: Média sazonal da primavera para as variáveis de NDVI, GPP e PREC. Fonte: Autores, 2025.

Conclusões

A metodologia aplicada para obtenção da Produtividade Primária Bruta GPP e demais

variáveis nos permitiu chegar as seguintes conclusões:

As regiões do Litoral e Brejo apresentaram os maiores valores médios de NDVI, superiores a 0,6, e de GPP, próximos de 200 gC/m²/mês, refletindo maior estabilidade na cobertura vegetal e maior capacidade de sequestro de carbono. No entanto nas regiões semiáridas, como o Sertão e o Cariri/Curimataú, os valores de NDVI variaram entre 0,2 e 0,5, consequentemente acompanhados de uma GPP mais baixa, o que evidencia a influência das limitações hídricas e a vulnerabilidade ambiental desses ecossistemas. Além disso, verificou-se que a resposta da vegetação às chuvas é mais rápida, porém menos duradoura, nas regiões do Agreste e Sertão, o que reforça a importância de estratégias de adaptação às condições climáticas adversas.

Em síntese o estudo confirmou a influência de fenômenos meteorológicos tais como, El Niño e La Niña sobre a dinâmica da vegetação, afetando consequentemente a produção padrões da GPP. Conclui-se que o monitoramento contínuo da GPP e do NDVI, aliado à análise de variáveis climáticas, pode subsidiar políticas públicas voltadas ao uso sustentável da terra, conservação dos recursos naturais e mitigação das emissões de carbono, especialmente em regiões com alta vulnerabilidade como o semiárido paraibano.

Contribuições dos autores

R.A.N.: Conceituação; análise formal; investigação; metodologia; escrita - rascunho original. C.C.B: Redação—revisão e edição. M.P.A.: Redação—revisão e edição. D.B.S: Redação—revisão e edição G.K.N.P.: Redação—revisão e edição. E.S.S: Redação—revisão e edição

Declaração de conflito de interesses

Não existem conflitos de interesse existentes entre os autores e instituições parceiras ou financiadores da pesquisa.

Referências

- AESA. Agência Executiva de Gestão das águas. <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas/>. Acesso em: 14 jun. 2024.
- ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.133, n.4, p.380-394, 2007.
- ANDRADE, A. C. S., & LIMA, J. R. (2022). *Influência das ondas de leste e sistemas meteorológicos na precipitação do litoral nordestino*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36(3), 117-131. Acesso em: 29 set. 2024
- ARAÚJO, L. S., & SILVA, J. L. (2021). *Dinâmica da Produtividade Primária Bruta no Semiárido Brasileiro: Relações com Sazonalidade e Uso do Solo*. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(3), 789-803. Acesso em: 20 set. 2024
- ARAÚJO, R. A., & ANDRADE, L. A. (2020). *Spatial and temporal rainfall variability in Paraíba, northeastern Brazil*. *Revista Brasileira de Climatologia*, 26, 217-235. Acesso em: 20 set. 2024
- BARBOSA, M. P., & CAVALCANTI, I. F. A. (2019). *Influência das ondas de leste na precipitação do Brejo paraibano*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 34(2), 191-205. Acesso em: 29 set. 2024
- BASTIAANSSEN, W. G. M.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 94, p.321-340, 2003.
- BASTIAANSSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLSLAG, A. A. M. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) – Formulation. *Journal of Hydrology*, v. 212-213, p.198-212, 1998.
- BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B. da; CORTEZ, J. R. G.; BRANDÃO, Z. N. Evapotranspiração real obtida através da relação entre o coeficiente dual de cultura da FAO-56 e o NDVI. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, p.404- 414, 2010.
- BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.23, n.3, p.305-317, 2008.
- BRAGA, A. P. (2013). *Estimativa da Produtividade Primária Bruta em Áreas Agrícolas e de Vegetação Primária no Cerrado por Sensoriamento Remoto*.
- CARMO, F. H. D. J. D. (2022). *Crescimento radial e propriedades tecnológicas da madeira de Tectona grandis Linn frente as variações climáticas e ocorrência de evento El Niño na Amazônia*.
- Castro Manrique, D. R., Lopes, P. M. O., Nascimento, C. R., Ribeiro, E. P., & Silva, A. S. D. (2024). *Phenological Monitoring of Irrigated Sugarcane Using Google Earth Engine, Time Series, and TIMESAT in the Brazilian Semi-arid*. *AgriEngineering*, 6(4), 3799-3822.
- Celis, J., Xiao, X., White Jr, P. M., Cabral, O. M., & Freitas, H. C. (2023). *Improved modeling of gross primary production and transpiration of sugarcane plantations with time-series Landsat and Sentinel-2 images*. *Remote Sensing*, 16(1), 46.

- COSTA, G. K. N. (2024). A precipitação pluvial nos meses de junho e julho nos sertões da Paraíba e seus impactos ambientais.
- DE BOZZANO RODRIGUES, R., DE ARAÚJO, S. M. S., BEZERRA, M. F., & DE SOUSA, L. A. (2022). Análise da dinâmica espacial e temporal do uso e ocupação do solo no município de Condado-PB (1989-2018). *Research, Society and Development*, 11(3), e8211326001-e8211326001.
- DE OLIVEIRA, G.; BRUNSELL, N. A.; CHEN J. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; MATAVELI, G. A. V.; DOS SANTOS C. A. C. C.; STARK S. C.; DE LIMA, A., AND ARAGAO, L. E. O. C. Legacy Effects Following Fire on Surface Energy, Water and Carbon Fluxes in Mature Amazonian Forests. *AGU, Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, p. 1-17, 2021.
- FERREIRA, G. R., & ALMEIDA, J. S. (2023). *Análise a Sazonalidade da Vegetação no Semiárido Paraibano Através de Índices de Vegetação e GPP*. *Acta Semiárido*, 9(2), 150-167. Acesso em: 30 set. 2024.
- FERREIRA, N. M., & MOURA, M. S. B. (2021). *Variações pluviométricas na zona costeira nordestina: Estudo de caso no litoral da Paraíba*. *Revista Brasileira de Climatologia*, 19(1), 45-59. Acesso em: 30 set. 2024.
- FIELD, C. B.; RANDERSON, J. T.; MALMSTROM, C. M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, v.51, p.74-88, 1995.
- FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D. *Climatologia do estado da Paraíba*. Campina Grande: EDUEFCG, 2017. 75 p. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/573985/2/Climatologia%20do%20Estado%20da%20Paraiba.pdf>. Acesso em 05 jan. 2024.
- GOMES, H. B., & ARAÚJO, J. L. (2020). *Caracterização do clima e da vegetação do Brejo Paraibano: Um estudo sobre as variações ambientais em função da pluviosidade*. *Cadernos de Geografia*, 33(1), 112-128. Acesso em: 28 set. 2024.
- GONZALEZ, A. L. S., & LIMA, R. C. (2020). *Estrutura da vegetação da caatinga em áreas do Cariri paraibano*. *Revista de Estudos Ambientais*, 30(2), 215-230. Acesso em: 28 set. 2024.
- IBRAHIM, A.B. An Analysis of Spatial and Temporal Variation of Net Primary Productivity over Peninsular Malaysia Using Satellite Data. Ph. D. Thesis, University Teknologi Malaysia, Johor, Malaysia, 2006.
- IVO, I. O. (2024). Estimativa do conteúdo de água no solo, evapotranspiração e produtividade primária bruta por reanálise e sensoriamento remoto nos biomas de Mato Grosso.
- LIMA, L. C., & NASCIMENTO, C. M. S. (2020). *Biodiversidade e estrutura da vegetação ripária no litoral da Paraíba: Um estudo comparativo*. *Revista Brasileira de Ecologia de Paisagens*, 15(1), 95-110. Acesso em: 01 out. 2024.
- LIMA, S. C. D., MORAES NETO, J. M. D., LIMA, J. P., LIMA, F. C. D., & SABOYA, L. M. (2023). Resposta da vegetação semiárida à seca agrícola determinada por índices derivados do satélite MODIS. *Revista Brasileira de Engenharia agrícola ambiental*, 27, 632-642.
- LVES, J. M. A., & NÓBREGA, R. L. B. (2021). *Vulnerabilidade às secas no semiárido paraibano: Um olhar sobre o Cariri e o Curimataú*. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(5), 1987-2001. Acesso em: 20 set. 2024.
- MEDEIROS, E. D. A. (2024). Variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial e eventos extremos no estado da Paraíba.
- MEDEIROS, J. F., & SANTOS, M. A. (2019). *A caatinga como bioma: Estrutura, dinâmica e conservação*. *Revista Brasileira de Botânica*, 42(1), 45-54. Acesso em: 28 set. 2024.
- MEDEIROS, S. S., SOUZA, D. F., & Lima, M. R. (2022). *Impactos da Sazonalidade Climática na Vegetação da Caatinga no Agreste Paraibano: Uma Análise de NDVI e GPP*. *Revista de Climatologia e Recursos Hídricos*, 18(1), 102-117. Acesso em 01 out. 2024.
- MOLION, L. C. B., & BERNARDO, S. D. O. (2000). Dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. In *XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Maceió (AL)* (pp. 1334-1342).
- MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, v.9, p.747-766, 1972.
- MOURA, J. C. A., & ARAÚJO, J. A. M. (2022). *Dinâmica dos manguezais no litoral da Paraíba: Mudanças espaciais e impactos ambientais*. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(4), 233-247. Acesso em 25 set. 2024.
- MOURA, M.S.B.; SILVA, B. B. da; AZEVEDO, P. V. Avaliação da Fração Evaporativa para Conversão de Medidas Instantâneas em Valores Diários de Evaporação. Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-graduação em Meteorologia, 2002.
- NÓBREGA, R. S., & OLIVEIRA, P. F. (2021). *A relação entre a umidade relativa do ar e o aumento das temperaturas em regiões semiáridas do Brasil*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35(2), 220-235. Acesso em 28 set. 2024.
- OLIVEIRA, M. L. D. (2023). Análise da dinâmica dos fluxos de água e carbono em diferentes coberturas do solo no Nordeste Brasileiro.
- PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- PEREIRA, A. C. S., & TABARELLI, M. (2021). *Fragmentação da Mata Atlântica costeira: Desafios para a conservação da biodiversidade no litoral da Paraíba*. *Biota Neotropica*, 21(2), e20201067. acesso em: 20 set. 2024

- SANTANA, R. O. D., DELGADO, R. C., WANDERLEY, H. S., PEREIRA, M. G., SOUZA, R. S. D., TRINDADE, L. R. S. L. C., & SOUZA, T. C. D. (2025). DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA NO PARQUE NACIONAL DE ITATIAIA.
- SANTOS, D. R. S.; MENDONÇA, J. S. A. Avaliação da Produtividade Primária Fitoplanctônica na Represa Samambaia em Goiânia – GO. Monografia apresentada em 2017 no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Goiás. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/avalia%C3%87%C3%83o_da_produtividade_prim%C3%81ria_fitoplanct%C3%94nica_na_represa_samambaia_em_goi%C3%82nia_-_go.pdf. Acesso em: 08 jan. 2024.
- SANTOS, H. R. B., & CARVALHO, J. M. (2020). *Condições áridas no semiárido brasileiro: Efeitos da baixa umidade e altas temperaturas*. *Cadernos de Geografia*, 40(3), 150-164. Acesso em: 20 set. 2024.
- SANTOS, M. G., & SILVA, F. R. (2020). *Estudos sobre a vegetação de restinga no litoral paraibano: Ecologia e conservação*. *Acta Botânica Brasilica*, 34(3), 417-426. Acesso em: 20 set. 2024.
- SHUTTLEWORTH, W. J.; GURNEY, R. J.; HSU, A. Y. E ORMSBY, J. P. FIFE: the variation in energy partition at surface flux site. IAHS Publ. No. 186, 1989.
- SILVA, A. C. D. (2018). *Estimativa de sequestro de carbono no bioma caatinga: estudo do balanço de carbono sob a influência da altitude* (Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco).
- SILVA, B. B. da; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 14, n. 2, p. 174-186, 2006.
- SILVA, Bernardo B. da. Balanços de radiação e energia com imagens TM – LANDSAT e OLI-IRTS – LANDSAT 8. Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-graduação em Meteorologia, 2020.
- SILVA, F. A. S., & NÓBREGA, R. S. (2021). Clima e vegetação no Brejo da Paraíba: Interações entre a Mata Atlântica e o regime de chuvas. *Revista Brasileira de Biogeografia*, 15(2), 67-82. Acesso em 29 set. 2024
- SILVA, F. L. B., & OLIVEIRA, T. G. (2022). *Secas e precipitação no semiárido: Um estudo sobre as áreas mais afetadas no estado da Paraíba*. *Revista Brasileira de Geografia*, 78(3), 325-340. Acesso em: 28 set. 2024
- Silva, I. B. D. (2024). *Estimativa da produtividade primária bruta em uma floresta tropical sazonalmente seca* (Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte).
- Silva, J. M. D. (2018). Reestruturação produtiva da pecuária e novas dinâmicas territoriais no município de Monteiro (PB).
- SILVA, J. N. B. D. (2022). Análise espaço-temporal dos fluxos de carbono no domínio da floresta tropical sazonalmente seca, caatinga.
- SILVA, J. N. B.; SOUZA, L. S. B.; GALVÍNCIO, J. D.; MIRANDA, R. Q.; MOURA, M.S.B. Modelos da Produtividade Primária Bruta em área de floresta tropical em sazonalmente seca, usando dados refletância da vegetação de caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.14, n.06, p. 3775-3784, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/252240/40221>. Acesso em: 08 jan. 2024.
- SILVA, J. R. P., & SOUZA, J. A. (2019). *Temperaturas extremas e baixa umidade no semiárido: Um estudo sobre a variabilidade climática no Nordeste brasileiro*. *Revista de Estudos Ambientais*, 21(4), 340-352. Acesso em 28 set. 2024
- SILVA, J. R., & SOUSA, F. A. S. (2020). *Análise da irregularidade das precipitações no Curimataú paraibano: Impactos e estratégias de adaptação*. *Cadernos de Geografia*, 45(2), 215-228. Acesso em 28 set. 2024
- SILVA, J. V. A. D., OLIVEIRA, L. R. D., SILVA, N. C. D. F., MOURA, C. M. D. S., & VITAL, S. R. D. O. (2024). Mapeamento da evolução histórica do uso e ocupação do solo no município de João Pessoa, Paraíba de 1985 a 2022. *Geopauta*, 8, e15608.
- SILVA, K. K. da. Avaliação da produtividade primária bruta da caatinga do semiárido paraibano. 2019. 64 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2019. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/11470>. Acesso em 08 jan. 2024.
- Silva, Karlla Karem da; Braga, Célia Campos; Silva, Madson Tavares; Costa, Wanessa Luana de Brito. PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA EM UMA ÁREA DE CAATINGA EM CAMPINA GRANDE-PB. In: TOLEDO, D. R., CORREIA, M. D. F., PALENZUELA, Y. G., ARAGÃO, M. R. D. S., LOPES, R. F. C., RODRIGUES, E. L., ... & MEDEIROS, R. M. D. (org.). *Meteorologia e recursos naturais: estudos aplicados*. 1.ed. Campina Grande-PB, 2020. p.521-528.
- SOUSA, F. A. S.; MOURA, G. B. (2021). *Temporal and spatial analysis of extreme rainfall events in the semiarid region of Paraíba, Brazil*. *Meteorological Applications*, 28(3), e2026. Acesso em: 28 set. 2024.
- SOUSA, I. H. P. D. (2024). Análise da suscetibilidade à degradação ambiental no município de Santana de Mangueira-PB (Bachelor's thesis).
- XIE, S.; MO, X.; LIU, S. Contributions of climate change, elevated atmospheric CO₂ and human activities to ET and GPP trends in the Three-North Region of China. *Agricultural and Forest*

Meteorology, 2020. Pa 1-14.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108183>.
