

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

# **METEOROLOGIA**



## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Rebeca Alves Neves**

**Fluxo de carbono e sua variação espaço-temporal na  
paraíba, utilizando sensoriamento remoto e dados  
meteorológicos**

**Campina Grande, Fevereiro de 2025**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**FLUXO DE CARBONO E SUA VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL NA PARAÍBA,  
UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS METEOROLÓGICOS**

REBECA ALVES NEVES

Campina Grande-PB

FEVEREIRO, 2025

REBECA ALVES NEVES

**FLUXO DE CARBONO E SUA VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL NA PARAÍBA,  
UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS METEOROLÓGICOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em  
Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande  
- UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do  
grau de Mestre em Meteorologia.

**Área de concentração:** Meteorologia de Meso e Grande Escala

**Sub-área:** Radiação e Sensoriamento remoto

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Célia Campos Braga

Campina Grande-PB

FEVEREIRO, 2025

N518f

Neves, Rebeca Alves.

Fluxo de carbono e sua variação espaço-temporal na Paraíba, utilizando sensoriamento remoto e dados meteorológicos / Rebeca Alves Neves. – Campina Grande, 2025.

70 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 20215.

"Orientação: Profa. Dra. Célia Campos Braga".

Referências.

1. Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>). 2. Sensoriamento Remoto. 3. Produtividade Primária Bruta (GPP). 4. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). 5. Climatologia – Paraíba. 6. Vegetação – Paraíba. 7. Semiárido Paraibano. I. Braga, Célia Campos. II. Título.

CDU 622.324.6:551.58(813.3)(043)

REBECA ALVES NEVES

FLUXO DE CARBONO E SUA VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL NA PARAÍBA,  
UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS METEOROLÓGICOS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/02/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 CELIA CAMPOS BRAGA  
Data: 06/03/2025 09:02:50-0300  
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. CÉLIA CAMPOS BRAGA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

Documento assinado digitalmente  
 BERNARDO BARBOSA DA SILVA  
Data: 06/03/2025 03:16:56-0300  
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

Documento assinado digitalmente  
 MARIA LUCIENE DIAS DE MELO  
Data: 06/03/2025 11:40:29-0300  
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. MARIA LUCIENE DIAS DE MELO  
Instituto de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Alagoas

Dedico este trabalho aos meus pais e minhas irmãs,  
com todo o meu amor e gratidão.

## AGRADECIMENTOS

Quero, primeiramente, agradecer a Deus, em quem sempre depus toda a minha fé e confiança no decorrer desse processo. Cada passo alcançado na realização desse mestrado senti o Seu cuidado e amor, me dando sabedoria e força para vencer os obstáculos árduos do caminho.

Aos meus pais, Luis e Gerusa, pelo zelo de estar sempre ao meu lado em todas as circunstâncias da vida. Vocês me ensinam desde a infância o valor da honestidade e perseverança, que desistir nunca será uma opção. Obrigada, por serem exemplos de amor, amparo, por ser meu alicerce e compartilhar alegrias e angústias e sempre darem o melhor de si para que hoje eu pudesse chegar até aqui. Às minhas irmãs, Jordânia e Sabrina, minhas inspirações. Através de vocês conheci o amor da irmandade, a união. Aprendi que laços de sangue é para sempre, graças a vocês eu tenho a certeza de que nunca estarei sozinha. Agradeço por estarem ao meu lado, me apoiando em todos os momentos.

Aos familiares, no geral, em especial à minha tia, Jacira e seu esposo Alcides, por terem sido casa, abrigo e pais durante esses dois anos de mestrado em Campina Grande. Jamais esquecerei os conselhos e orações dedicadas a mim. Minhas tias (Gilsa e Luciana), vocês são essenciais em minha vida. Agradeço também às minhas primas pela parceria e amizade durante a construção desse trabalho. Amo todos, cada um ao seu modo.

Às minhas amigas, Geisse, Mônica e Silânia, por compartilhar as alegrias e os desafios dessa jornada. Sou grata por todo o apoio, cumplicidade e pelas memórias construídas juntas. O momento com vocês, sempre me motivou a continuar. Ao meu colega e amigo, Edivan, por cada ajuda, ensinamento, atenção e paciência na construção dos resultados do meu trabalho. Obrigada!

Um agradecimento especial à minha orientadora, Profa. Dra. Célia Campos Braga, por sua orientação, dedicação e apoio incondicional ao longo desta jornada. Sempre solícita e disposta a me ajudar da melhor forma possível. Sua sabedoria, paciência e incentivo, foram fundamentais para a realização deste trabalho. Sou imensamente grata por ter aceitado esse desafio comigo e pela oportunidade de aprender com alguém por quem nutro grande carinho e admiração.

Meus agradecimentos ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, na pessoa do Coordenador Prof. Dr. Madson Tavares Silva, graças ao projeto, financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, intitulado “**Fenômenos meteorológicos extremos no Nordeste Brasileiro (NEB) e seus impactos na sociedade e no meio ambiente**”. Pude ser bolsista do CNPq e hoje estar finalizando esse trabalho.

Também registro minha gratidão à secretária, Arilene, uma funcionária excelente e eficiente, que sempre se dispôs a me ajudar e orientar nos processos ao longo de todo o mestrado, com muita atenção e prontidão. Obrigada!

“O nobre projeta coisas nobres; e nas coisas nobres persistirá”

(Isaías 32:8)

## RESUMO

O dióxido de carbono ( $CO_2$ ), juntamente com outros gases atmosféricos como metano, ozônio, clorofluorcarbonos (CFCs) e óxido nitroso ( $N_2O$ ), desempenham um papel fundamental como gás de efeito estufa, contribuindo para a regulação térmica do planeta. Esses gases também são essenciais para a fotossíntese, processo pelo qual a vegetação absorve  $CO_2$  e o converte em biomassa. A Produtividade Primária Bruta (GPP) quantifica o carbono absorvido pela vegetação via fotossíntese que é uma métrica essencial para monitorar a saúde dos ecossistemas. Adicionalmente, índices de vegetação como o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) são ferramentas fundamentais para o monitoramento ambiental, fornecendo informações sobre o estado fenológico da vegetação e seus impactos no clima e no ambiente. Neste contexto, o objetivo do estudo foi avaliar a variabilidade espacial, sazonal e anual da quantidade de  $CO_2$  capturada pela vegetação no estado da Paraíba-PB, a partir da GPP no período de 2003 a 2022. Para isso, utilizaram-se dados do NDVI (MOD13A2), GPP (MOD17A2H) do satélite MODIS/Terra, climáticos do ERA5, medidos em cinco (05) estações meteorológicas do INMET e da precipitação de 102 postos/estações da AESA-PB. Determinaram-se os padrões de variabilidade temporal e espacial do NDVI e GPP obtidos pelos produtos do MODIS. Em seguida estimou-se a GPP pelo método de Monteith (1972), utilizando dados do MODIS, ERA5 e medidos em estações meteorológicas. Os resultados obtidos mostraram uma relação espacial e temporal expressiva entre a disponibilidade hídrica e o desenvolvimento da vegetação, destacando-se a vulnerabilidade do semiárido paraibano, aos eventos climáticos extremos, como as secas severas. Para fazer a avaliação dos dados estimados GPPMODIS com GPPMonteith 1972, fez-se uso das técnicas estatísticas dos métodos dos mínimos quadrados e índice de Willmott. As correlações obtidas entre a GPP MODIS e método Monteith (1972), apresentaram os melhores resultados para as localidades de Monteiro com de  $R=0,71$  e Patos  $R=0,81$ , respectivamente. Ou seja, para essas localidades ambos os métodos foram eficazes para mostrar as variações da GPP. Por outro lado, João Pessoa, Campina Grande e Areia apresentaram valores menos expressivos (piores correlações) com  $R=0,12$ ,  $0,39$  e  $0,31$ , respectivamente, sugerindo uma baixa concordância entre os métodos, possivelmente devido aos efeitos da urbanização, já que elas estão próximas de regiões metropolitanas. Esses valores mostram que as variações na GPP calculadas pelos dois métodos não estão bem relacionadas nessas cidades, destacando que o método de Monteith (1972) foi mais eficiente em captar variações locais, enquanto o MODIS ofereceu estimativas mais integradas espacialmente. Desta forma, a análise da Produtividade Primária Bruta (GPP) no estado da Paraíba revelou forte dependência da vegetação em relação à disponibilidade hídrica, com destaque para a vulnerabilidade das regiões semiáridas. O estudo reforça a importância do sensoriamento remoto para o monitoramento ambiental e a formulação de políticas públicas voltadas à resiliência climática.

**Palavras-chave:** Dióxido de carbono ( $CO_2$ ); Sensoriamento Remoto; Produtividade Primária Bruta (GPP); Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

## ABSTRACT

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), along with other atmospheric gases such as methane, ozone, chlorofluorocarbons (CFCs) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), play a fundamental role as a greenhouse gas, contributing to the planet's thermal regulation. These gases are also essential for photosynthesis, the process by which vegetation absorbs CO<sub>2</sub> and converts it into biomass. Gross Primary Productivity (GPP) quantifies the carbon absorbed by vegetation via photosynthesis and is an essential metric for monitoring the health of ecosystems. Additionally, vegetation indices such as NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) are fundamental tools for environmental monitoring, providing information on the phenological state of vegetation and its impacts on climate and the environment. In this context, the objective of the study was to evaluate the spatial, seasonal and annual variability of the amount of CO<sub>2</sub> captured by vegetation in the state of Paraíba-PB, based on GPP in the period from 2003 to 2022. For this purpose, data from NDVI (MOD13A2), GPP (MOD17A2H) from the MODIS/Terra satellite, climate data from ERA5, measured at five (05) INMET meteorological stations and precipitation from 102 AESA-PB stations/stations were used. The patterns of temporal and spatial variability of NDVI and GPP obtained by MODIS products were determined. Then, GPP was estimated by the Monteith (1972) method, using data from MODIS, ERA5 and measured at meteorological stations. The results obtained showed a significant spatial and temporal relationship between water availability and vegetation development, highlighting the vulnerability of the semiarid region of Paraíba to extreme climatic events, such as severe droughts. To evaluate the data estimated by GPPMODIS with GPPMonteith 1972, statistical techniques such as the least squares method and the Willmott index were used. The correlations obtained between the GPP MODIS and the Monteith (1972) method presented the best results for the localities of Monteiro with  $R = 0.71$  and Patos with  $R = 0.81$ , respectively. In other words, for these localities, both methods were effective in showing the variations in the GPP. On the other hand, João Pessoa, Campina Grande and Areia presented less expressive values (worse correlations) with  $R = 0.12$ ,  $0.39$  and  $0.31$ , respectively, suggesting a low agreement between the methods, possibly due to the effects of urbanization, since they are close to metropolitan regions. These values show that the variations in GPP calculated by the two methods are not well correlated in these cities, highlighting that the Monteith (1972) method was more efficient in capturing local variations, while MODIS offered more spatially integrated estimates. Thus, the analysis of Gross Primary Productivity (GPP) in the state of Paraíba revealed a strong dependence of vegetation on water availability, with emphasis on the vulnerability of semiarid regions. The study reinforces the importance of remote sensing for environmental monitoring and the formulation of public policies aimed at climate resilience.

**Keywords:** Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>); Remote Sensing; Gross Primary Productivity (GPP); Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração da evolução urbana e de áreas agrícolas no estado da Paraíba com ênfase para as cinco localidades estudadas. Fonte: MAPBIOMAS, 2024 ( Adaptado pela Autora, 2024).....	22
Figura 2: Mapa do Brasil, destacando o estado da Paraíba com suas respectivas regiões Pluviometricamente Homogêneas. Fonte: BRITO e BRAGA, 2005 (adaptado pela Autora, 2024).....	29
Figura 3: Espacialização dos 102 postos especificando as cinco estações meteorológicas nas regiões do Estado da Paraíba. Fonte: Autora, 2024.....	31
Figura 4: Fluxograma referente ao procedimento metodológico do estudo. Fonte: Autora, 2024.....	32
Figura 5: Totais médios anuais de precipitação no período de 2003 até 2022. Fonte: Autora, 2025.....	35
Figura 6: Média anual do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para o período de 2003 até 2022. Fonte: Autora, 2025.....	36
Figura 7: Média anual da Produtividade Primária Bruta (GPP) para o período de 2003 até 2022. Fonte: Autora, 2025.....	37
Figura 8: Média sazonal do verão para as variáveis de NDVI, GPP e PREC. Fonte: Autora, 2025. ....	41
Figura 9: Média sazonal do outono para as variáveis de NDVI, GPP e PREC. Fonte: Autora, 2025.....	41
Figura 10: Média sazonal do inverno para as variáveis de NDVI, GPP e PREC. Fonte: Autora, 2025.....	42
Figura 11: Média sazonal da primavera para as variáveis de NDVI, GPP e PREC. Fonte: Autora, 2025.....	42
Figura 12: Totais mensais de precipitação para o período de 2003 a 2022 nas seis regiões homogêneas do Estado da Paraíba. Fonte: Autora, 2025.....	44
Figura 13: Variabilidade temporal entre métodos de estimativa de Produtividade Primária Bruta (GPP), para cinco localidades: a) Areia-PB, b) Campina Grande-PB, c) João Pessoa-PB, d) Monteiro-PB e e) Patos-PB, para o período de 2008-2022. Fonte: Autora, 2025.....	47

Figura 14: Diagrama de dispersão e curva de correlação entre os Métodos de obtenção da GPP MODIS e Monteith para as cinco localidades: a) Areia-PB, b) Campina Grande-PB, c) João Pessoa-PB, d) Monteiro-PB e e) Patos-PB no período de 2008-2022 no estado da Paraíba. Fonte: Autora, 2025.....49

Figura 15: Comparação entre os Métodos de Obtenção da GPP e o NDVI, para cinco localidades: a) Areia-PB, b) Campina Grande-PB, c) João Pessoa-PB, d) Monteiro-PB e e) Patos-PB no período de 2008-2022 no estado da Paraíba. Fonte: Autora, 2025.....53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dias específicos, selecionados para a obtenção dos dados meteorológicos. Fonte: Autora, 2025 .....	30
Tabela 2: Métricas estatísticas comparando o GPP obtido via MODIS e Método Monteith (1972). Fonte: Autora, 2025 .....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas  
EMA - Erro Médio Absoluto  
EOS - Earth Observing System  
EPAM - Erro Percentual Absoluto Médio  
ERA5 - Land Daily Aggregated - Reanálise Climática do ECMWF  
EVI - Enhanced Vegetation Index  
GEE - Google Earth Engine  
GPP - Gross Primary Productivity  
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IMG - Imagine  
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia  
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
IVDN - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada  
LANSAT - Land Remote Sensing Satellite  
MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer  
NASA - National Aeronautics and Space Administration  
NEB - Nordeste Brasileiro  
NDVI - Normalized Difference Vegetation Index  
PPB - Produtividade Primária Bruta  
REQM - Raiz do Erro Quadrático Médio  
RFA - Radiação Fotossinteticamente Ativa  
RFAA - Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida  
RH - Regiões Homogêneas  
SIG - Sistemas de Informações Geográficas  
UR - Umidade relativa  
VCANs - Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis  
ZCIT - Zona de Convergência Intertropical  
ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul  
PREC - Precipitação pluviométrica

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{CO}_2$  - Dióxido de carbono

$\text{CFC}_5$  - Clorofluorcarbonos

$|\text{EP}|$  - é o valor absoluto do erro de previsão para os dados observados

$\text{N}_2\text{O}$  - Óxido nitroso

$T_{\text{opt}}$  - Temperatura média do ar do mês de máximo NDVI

$T_{\text{dia}}$  - Temperatura média diária do ar

$\epsilon$  - Eficiência do uso da luz

$\epsilon'$  - Eficiência máxima de uso da luz

$\Lambda$  - Fração evaporativa

$S_i$  - Variáveis simuladas

$O_i$  - Variáveis observadas

$n$  - Número de observações

$x$  - variáveis observadas

$y$  - variáveis simuladas

$r$  - Correlação linear de Person

$R^2$  - Coeficiente de determinação

$I$  - Índice de Willmoth

$\text{LE}$  - Fluxo de calor latente

$H$  - Densidade do fluxo de calor sensível.

$R_n$  - Saldo de radiação

$G$  - Densidade do fluxo de calor no solo

$R_{s24h\downarrow}$  - Radiação solar global diária no período de 24 horas.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
2. OBJETIVOS.....	19
2.1 Objetivo geral.....	19
2.2 Objetivos específicos.....	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1 Estado da Paraíba.....	20
3.2 Ciclo de Carbono.....	22
3.3 Sensoriamento Remoto.....	23
3.4 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN ou NDVI).....	25
3.5 Produtividade Primária Bruta (PPB ou GPP).....	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
4.1 Área de estudo.....	29
4.2 Dados.....	29
4.3 Metodologia.....	31
4.3.1 Análise estatística.....	34
5 RESULTADO E DISCUSSÃO.....	35
5.1 Climatologia do Estado da Paraíba.....	35
5.2 Média anual do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).....	36
5.3 Média anual da Produtividade Primária Bruta (GPP).....	37
5.4 Análise espacial e sazonal da PREC, GPP e NDVI.....	38
5.5 Regiões Homogêneas do Estado da Paraíba.....	43
5.5.1 Precipitação do Estado da Paraíba.....	43
5.6 Relação Funcional entre GPP MODIS/Terra e o método Monteith (1972).....	45
CONCLUSÃO.....	54
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	55
REFERÊNCIAS.....	56

## 1. 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 estão profundamente interligadas com o ciclo do carbono. Processos como a fotossíntese, a respiração, a decomposição e a dissolução de CO<sub>2</sub> nos oceanos e vegetação influenciam diretamente as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera (Almeida, 2024).

Nos últimos tempos, os níveis de CO<sub>2</sub> 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, o Brasil por sua vez atingiu 2,3 bilhões de toneladas brutas de gases do efeito estufa em 2022 (Chen et al., 2020; Martins & Souza, 2024). A alta variabilidade temporal e espacial do balanço do CO<sub>2</sub>, os efeitos dos aerossóis no fluxo do CO<sub>2</sub> entre a vegetação e atmosfera e as consequentes trocas de energia têm sido uma preocupação geral da comunidade científica mundial (Xie 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).

Estudos regionais sobre gases de efeito estufa têm sido amplamente conduzidos para avaliar as emissões e seus impactos em diferentes ecossistemas. Morais et al. (2017) realizaram uma pesquisa significativa que analisou as emissões de carbono e metano em áreas de vegetação nativa no Cerrado. Por sua vez, Silva (2018) focou na relação entre o uso da terra e a liberação de gases de efeito estufa, com ênfase nas áreas agrícolas da Caatinga. Ribeiro et al. (2016) e Signor et al. (2022) ampliaram esse escopo, estudando tanto o Cerrado quanto a Caatinga, abordando as variáveis climáticas que influenciam a intensidade das emissões nessas regiões semiáridas do Nordeste. Já Costa (2023) investigou os efeitos combinados das mudanças climáticas e da degradação do solo sobre os fluxos de gases de efeito estufa, destacando como essas dinâmicas impactam as áreas mais vulneráveis do semiárido brasileiro. Em conjunto, esses estudos sublinham a importância dos biomas Cerrado e Caatinga na dinâmica de emissões de gases de efeito estufa na região semiárida do Nordeste do Brasil, ressaltando a necessidade de estratégias de mitigação adaptadas a essas áreas. Nesse contexto, é essencial compreender e avaliar o comportamento e a quantidade de carbono capturado da atmosfera por meio da Produtividade Primária Bruta (GPP) em uma região específica. Esse processo, que transforma CO<sub>2</sub> e luz solar em biomassa, desempenha um papel crucial no crescimento das plantas e na

formação de novos tecidos vegetais, sendo vital para a manutenção da saúde dos ecossistemas (Nunes et al., 2020; Dos Anjos et al., 2023).

Ecossistemas com alta GPP, como florestas, atuam como sumidouros de carbono, absorvendo mais CO<sub>2</sub> da atmosfera do que liberam. Isso ajuda a reduzir as concentrações de CO<sub>2</sub> atmosférico e mitigar o aquecimento global (Qin et al., 2021; Duncanson et al., 2023). De Oliveira et al. (2022) 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 do bioma em absorver o CO<sub>2</sub> modificando o microclima regional.

A determinação da Produtividade Primária Bruta (GPP) pode ser realizada por meio de uma alternativa de baixo custo operacional, que é o sensoriamento remoto. Nesse caso, a GPP pode ser estimada utilizando a coleção MOD17A2H ou pelo método de Monteith (1972), que envolve a relação entre a eficiência de uso da luz ( $\epsilon$ ) e a radiação fotossinteticamente ativa, absorvida pela vegetação (RFAA), a qual pode ser estimada a partir de índices de vegetação, usando dados dos produtos MODIS/Terra e dados medidos de estações automáticas. Para este estudo, a GPP foi obtida utilizando a plataforma Google Earth Engine (GEE), que processa e estima os valores a partir da coleção MOD17A2H, e os resultados foram comparados com os obtidos pelo método de Monteith (1972).

Assim sendo, levando em consideração os indicadores analíticos anteriores, bem como a potencialidade e importância que é estudar captura de CO<sub>2</sub> da atmosfera, o propósito deste estudo é avaliar a variabilidade sazonal e anual da GPP em diferentes regiões do estado da Paraíba, utilizando dados dos produtos MODIS/terra, ERA5 e estações meteorológicas distribuídas pelo Estado.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a variabilidade espacial sazonal e anual da quantidade de CO<sub>2</sub> a partir da Produtividade Primária Bruta-GPP no estado da Paraíba usando dados de satélites e estações meteorológicas.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar a variação espaço temporal da GPP no período de 20 anos no Estado da Paraíba usando dados a partir da plataforma GEE;
- Estimar a Produtividade Primária Bruta (GPP) usando o método de Monteith (1972) com dados obtidos por estações meteorológicas, MODIS/Terra e ERA5;
- Fazer a análise comparativa entre a GPP obtida pelo GEE e a estimada pelo método Monteith (1972).

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Estado da Paraíba**

O estado da Paraíba está localizado na região Nordeste do Brasil-NEB, possui 223 municípios, os quais apresentam características geográficas peculiares com distintos regimes pluviométricos. Possui área territorial de 56.467,242  $km^2$ , com população de aproximadamente 3.974.687 habitantes (IBGE, 2022). Está localizado na região tropical entre os paralelos 6°02'12" e 8°19'18" S, e entre os meridianos 34°45'54" e 38°45'45" W. Faz fronteira ao norte com o estado do Rio Grande do Norte, a leste com o Oceano Atlântico, o qual desempenha papel importante na moderação térmica e na disponibilidade de umidade, impactando as condições climáticas costeiras. A oeste a Paraíba se limita com o estado do Ceará e ao sul com o estado de Pernambuco, contribuindo com a complexidade do clima paraibano (Francisco, 2010).

A diversidade vegetativa do estado é bem notável, cujo bioma predominante é a Caatinga, que ocupa aproximadamente 90% de seu território, principalmente nas regiões centrais e ocidentais, caracterizadas por condições mais áridas. No leste do estado as condições são mais favoráveis, encontrando não só a presença da Caatinga mais também resquícios de Mata Atlântica, Cerrados e uma vegetação litorânea (Brito & Braga 2005).

Seguindo na mesma perspectiva, o Estado apresenta dois distintos padrões de chuvas: o primeiro ocorre de fevereiro a maio, abrangendo as regiões do Alto Sertão, Sertão e Cariri/Curimataú. O segundo, por sua vez se estende de abril a julho afetando as áreas do Agreste, Brejo e Litoral. As distribuições de chuvas são influenciadas por diversos fatores atmosféricos e oceânicos, que variam conforme a região (Litoral, Agreste e Sertão). Cada sistema climático afeta a distribuição das chuvas de maneira diferenciada ao longo do ano. A Zona de Convergência Intertropical- ZCITs é uma faixa de convergência de ventos alísios vindos do hemisfério norte e do hemisfério sul, que provoca a elevação do ar e a formação de nuvens quando a ZCIT se desloca para o sul durante o verão e o início do outono, pode trazer chuvas para as regiões mais ao norte da Paraíba, particularmente no litoral e agreste. Outros fenômenos importantes são: Frentes Frias, Ondas de Leste, Fenômeno El Niño/La Niña, Brisa Marítima e Chuvas Orográficas. Inicialmente, regiões de diferentes regimes pluviométricos foram classificadas por Braga e Silva (1990). Posteriormente, foram aprimoradas por Brito e Braga (2005) usando técnicas objetivas de agrupamentos da análise multivariada, subdividindo o estado da Paraíba em sete (06) regiões pluviométricas homogêneas-RH. Neste estudo, numa

nova classificação adaptada dos referidos autores, o estado também foi subdividido em seis (06) RH: Litoral, Brejo, Agreste, Cariri/Curimataú, Sertão e Alto Sertão.

Assim, o estado foi subdividido de acordo com suas características geomorfológicas, que refletem os principais tipos climáticos observados: úmido, subúmido e semiárido, com totais médios anuais de precipitação inferiores a 400 mm na região central, e superiores a 1900 mm no litoral do estado e com temperaturas elevadas, oscilando entre 22°C e 30°C e média de 26°C, as quais são fortemente influenciadas pelo relevo local (Braga & Brito, 2005; Silva, 2018).

Nos últimos 20 anos, a Paraíba passou por profundas transformações urbanas e agrícolas. A expansão urbana, impulsionada pela forte atuação do setor imobiliário em cidades como João Pessoa, Patos e Campina Grande, juntamente com as mudanças no uso e ocupação do solo, impactou diretamente o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e a Produtividade Primária Bruta (GPP), que mede a quantidade de carbono fixado pelas plantas por meio da fotossíntese. Esse crescimento acelerado gerou desigualdades socioespaciais e aumentou a pressão sobre o meio ambiente (Silva, 2018; Martins et. al, 2024). No campo, observou-se a modernização e expansão significativa da agricultura, principalmente, em quase toda região do Litoral e em polos específicos. Com a introdução de novas tecnologias, sistemas de irrigação e o fortalecimento da pecuária, como exemplificado pela reestruturação da atividade pecuária no município de Monteiro (Silva et. al, 2024). Toda essa evolução pode ser observada na Figura 1.

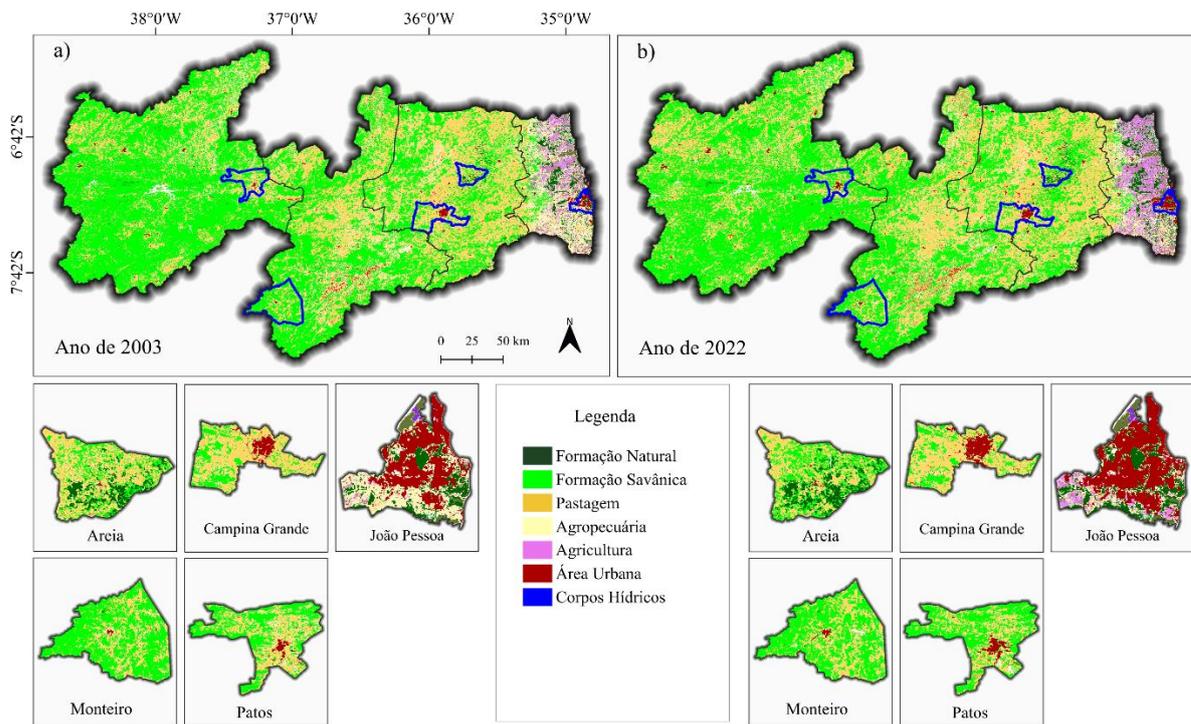


Figura 1: Ilustração da evolução urbana e de áreas agrícolas no estado da Paraíba com ênfase para as cinco localidades estudadas. Fonte: MAPBIOMAS, 2024 ( Adaptado pela Autora, 2024).

### 3.2 Ciclo de Carbono

Ao longo das últimas décadas, observou-se um aumento significativo nas emissões e nas concentrações de gases poluentes na atmosfera. Dentre esses poluentes, destacam-se o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), cuja elevação está diretamente associada ao uso intensivo de combustíveis fósseis, ao desmatamento, às atividades agropecuárias, dentre outras. Essas práticas têm perturbado o equilíbrio dos ecossistemas de maneira acelerada, desencadeando mudanças climáticas globais. Segundo o sexto relatório-AR6 (IPCC, 2023), as emissões dos gases de efeito estufa apresentaram um aumento de aproximadamente 12% entre o período de 2010 a 2019, 54% a mais do que em 1990, tendo as maiores emissões médias anuais do que em qualquer década anterior.

As mudanças climáticas nos últimos anos têm crescido de forma preocupante e danos irreversíveis a saúde humana e do planeta são diagnosticados. Extremos climáticos têm se tornados causadores de problemas de disseminação de doenças de veiculação hídrica, como

também, o comprometimento da capacidade de produção de alimento para a população, principalmente em regiões de grande desigualdade social e baixo desenvolvimento. O aumento do efeito estufa, resultado dessas emissões crescentes, está contribuindo para o aquecimento global, impactando negativamente os padrões climáticos em escala mundial. É de suma importância que medidas sustentáveis sejam implementadas para mitigar esses efeitos adversos e promover a conservação ambiental a longo prazo (Crespo et al., 2023).

O ciclo do carbono opera de forma análoga ao ciclo da água, em que a energia solar desempenha o papel de força motriz. No entanto, o ciclo do carbono apresenta uma complexidade maior devido às diversas reações químicas que o carbono atravessa. As fases envolvidas na circulação do carbono pelos ecossistemas incluem reações assimilativas e desassimilativas, além da troca de  $CO_2$  entre a atmosfera e os oceanos. O ciclo também abrange a precipitação de sedimentos de carbono nos oceanos, completando um processo complicado e essencial para a regulação do equilíbrio ambiental (Ricklefs, 2012; Silva, 2018).

As pesquisas sobre o ciclo global do carbono têm na zona costeira um foco crucial. Esses ecossistemas despertam grande interesse devido à intensa atividade de processos biogeoquímicos que envolvem o carbono e nutrientes. Além disso, a zona costeira é caracterizada por uma considerável acumulação de sedimentos, o que a torna uma região significativa para entender as dinâmicas ambientais e os impactos do ciclo do carbono (Souza et al., 2012).

### **3.3 Sensoriamento Remoto**

O sensoriamento remoto teve seu marco inicial coincidindo com o advento das máquinas fotográficas (Jensen, 2015). Nesse contexto, a exploração da superfície terrestre começou a ser concebida por meio de imagens capturadas do alto, muitas vezes utilizando balões como plataforma. Essa abordagem visava a identificação de características específicas de determinadas localidades ou a elaboração de mapas detalhados de áreas específicas. Ao longo do tempo, essa prática evoluiu para um conjunto de técnicas e tecnologias avançadas, permitindo a representação e a coleta de dados da superfície terrestre sem a necessidade de contato direto. Sensores e instrumentos espaciais instalados a bordo de satélites meteorológicos e ambientais desempenharam um papel importante fornecendo informações abrangentes sobre os diversos fenômenos presentes na superfície do planeta (Li, D., Wang, Z., & Yang, G, 2018).

Devido a ação do homem e mesmo provocado pelas intempéries do tempo, grandes áreas de cobertura vegetal nativa vêm desaparecendo, de modo que surge a necessidade de monitorar a vegetação. Assim, com o advento de dados obtidos através de sensoriamento remoto, as pesquisas voltadas ao estudo da dinâmica da vegetação tornaram-se mais fáceis e operacionais, possibilitando fazer o monitoramento de extensas áreas, usando informações obtidas de satélites meteorológicos e ambientais (Chen et al. 2020; Souza et al. 2022).

Dados obtidos dos sistemas de sensores orbitais são de importância fundamental no tratamento, análise e armazenamento de informações diversas na natureza. Eles desempenham um papel relevante no desenvolvimento de técnicas e estudos que contribuem para a preservação e compreensão da vegetação, assim como a análise da evolução das áreas urbanas e o monitoramento de fenômenos ambientais críticos, como o desmatamento (Pena, 2023).

Do ponto de vista meteorológico, o impacto da degradação vegetal e as mudanças na cobertura vegetal têm implicações diretas nas condições atmosféricas e nos padrões climáticos locais e regionais. A degradação da vegetação contribui para a emissão de gases de efeito estufa, influenciando diretamente o balanço de energia na atmosfera. A capacidade de estimar a concentração de CO<sub>2</sub>, juntamente com outros parâmetros meteorológicos, permite que meteorologistas avaliem o impacto das mudanças nas condições atmosféricas de um determinado local ou região (Silva, 2018).

O Sensoriamento Remoto desempenha papel crucial ao fornecer dados detalhados sobre possíveis mudanças ocorridas na cobertura vegetal dos biomas. Além disso, o sensoriamento remoto proporciona *insights* sobre padrões de uso da terra, indicadores de degradação ambiental e as condições gerais do ecossistema. Esses dados são essenciais para o entendimento das interações entre a vegetação, a atmosfera e o clima (Silva & Souza, 2005 a 2008). Portanto, o Sensoriamento Remoto é uma ferramenta valiosa para monitorar e compreender as mudanças ambientais e climáticas decorrentes tanto pela degradação, como evolução da vegetação de uma determinada região (Rosendo, 2005).

Com o avanço de novas tecnologias vinculadas aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), a caracterização do solo ganhou destaque como uma área chave para a aplicação dessas tecnologias. Isso se deve à facilidade de representação e interação com dados mapeados e georreferenciados (Talles, 2022). Na prática, pode-se dizer que o acesso aos dados e imagens de satélites pode ser facilmente encontrado nas plataformas digitais, onde estão disponíveis dados oficiais dos sensores e o catálogo das imagens capturadas por eles. Durante

esse processo, ao examinar os arquivos disponibilizados pode-se identificar a presença de imagens com cobertura de nuvens. Ao aplicar um filtro, é possível realizar uma análise mais precisa do comportamento das variáveis na região em estudo (Silva, 2020).

O sensoriamento remoto é amplamente utilizado na Paraíba para monitorar a vegetação, recursos hídricos, mudanças climáticas e uso do solo (Gonçalves et al., 2021; Silva, & da Silva, 2023). Ele auxilia no acompanhamento da dinâmica da Caatinga, gestão de recursos hídricos, agricultura de precisão, planejamento urbano e estudos de degradação ambiental. Ferramentas como NDVI e sensores MODIS e Landsat são essenciais para avaliar impactos da seca, identificar áreas degradadas e apoiar a recuperação ambiental. Essas aplicações promovem uma gestão eficiente dos recursos naturais, orientam políticas públicas e fortalecem estratégias de adaptação às condições do semiárido.

### **3.4 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN ou NDVI)**

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, em inglês NDVI, desenvolvido por Rouse et al. (1973), é um dos índices mais utilizados para medir o vigor da vegetação. Seu princípio físico se baseia na fisiologia espectral das plantas, tendo em vista que a vegetação verde e saudável absorve fortemente a radiação solar faixa espectral do vermelho para realizar o processo de fotossíntese. Por outro lado, as células das plantas refletem mais na faixa espectral do infravermelho próximo. Quanto mais verdes, nutridas, saudáveis e bem supridas do ponto de vista hídrico for a planta, maior será a absorção do vermelho e maior será a reflectância do infravermelho. Deste modo, a diferença entre as reflectâncias dessas duas bandas será maior, quanto mais verde estiver a vegetação. Embora extremamente útil na estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação, o NDVI apresenta problemas de saturação em áreas densamente vegetadas (Ferreira et al., 2008; Ramos, 2016; Costa et al., 2019).

Diante dessas limitações, existem na literatura outros índices capazes de contorná-las, tais como o índice de vegetação melhorado, EVI (Enhanced Vegetation Index) proposto por Huete et al. (1997). O mesmo foi criado com objetivo de otimizar o sinal da vegetação, em regiões com maiores densidades de biomassa, pois além de monitorar o fundo dossel (solo), corrige também as influências atmosféricas (Latorre et al., 2003).

Tanto o NDVI como EVI são bastante semelhantes e fornecem informações valiosas sobre a saúde da vegetação, ajudando na compreensão de impactos climáticos, como modulação do microclima em áreas florestais. Além disso, eles são aplicados na detecção de seca e previsão

de zonas de incêndio, contribuindo significativamente para a análise e previsão de eventos climáticos e ambientais (EOS Data Analytics, 2024). Neste estudo optou-se pelo o NDVI, por ser simples e eficiente na sua capacidade de identificar áreas vegetadas, consolidando-se como o índice de vegetação mais prevalente (Branquinho & Felzenzwalb, 2007).

Diante do exposto o NDVI é uma ferramenta bastante empregada no monitoramento da vegetação, em estudos que abrangem a construção de perfis temporais, sazonais e fenológicos. Sua aplicação inclui análises do vigor da vegetação, períodos de crescimento, investigações climáticas e estudos sobre mudanças agrícolas e florestais (Belolli, 2019). Pois, a partir de dados de imagens de satélites meteorológicos e ambientais, pode-se monitorar a sensibilidade da vegetação, a radiação fotossinteticamente ativa, determinar índices de biomassa, realçando alvos vegetados em relação à água e sol, fotossíntese, estoques de carbono e balanço hídrico (Lillesand et al., 2007).

A cobertura vegetal de uma dada localidade está relacionada ao tipo de clima e de solo predominante nessa região, que pode ser influenciada por um conjunto de fatores, tais como: clima, relevo, solo e suas características associadas. Portanto, vários estudos vêm sendo realizados para estimar variáveis biofísicas, através de imagens de satélite, mais precisamente através dos índices de vegetação (Allen et al., 1998; Chen et al., 2004; Assis & Omasa, 2007; Bakr et al., 2010; Francisco et al. 2020).

Estudos apresentados por (Rocha, 2022; de Medeiros et al., 2022) investigou como o aumento da urbanização afeta o microclima local. Por meio de índice como o NDVI, foram identificadas perdas de vegetação e aumento de temperaturas no perímetro urbano. Essa análise evidencia o impacto direto da urbanização na cobertura do solo e nas condições climáticas locais, contribuindo para a compreensão das mudanças microclimáticas em áreas urbanas.

Podemos analisar que as mudanças na cobertura vegetal durante períodos com diferentes intensidades pluviométricas, utilizando o NDVI, avalia a influência das chuvas na recuperação da vegetação. Mostrando que, apesar de condições pluviométricas desfavoráveis em alguns meses, os períodos de precipitação mais concentrada são suficientes para recuperar parcialmente a vegetação, destacando a resiliência ecológica da região semiárida.

Essas pesquisas oferecem subsídios valiosos para a formulação de políticas públicas voltadas à conservação ambiental, manejo sustentável do solo e adaptação às mudanças climáticas no semiárido paraibano.

### **3.5 Produtividade Primária Bruta (PPB ou GPP)**

Estudos envolvendo troca de energia nos ecossistemas oferecem informações cruciais para a compreensão da produtividade dos biomas de modo geral. A vegetação desempenha um papel central na biosfera terrestre regendo e executando a atividade fotossintética, influenciando nas trocas de carbono entre os ecossistemas e a atmosfera. Dentro desse cenário, torna-se imperativa a utilização da Produção Primária Bruta (GPP) para a avaliação, planejamento e gestão dos recursos ambientais diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas globais (Silva, 2021).

A Produtividade Primária Bruta (GPP) é equivalente à fotossíntese bruta, conforme estabelecido por Hunt Jr. et al. (2004) e Xiao et al. (2004). Sua determinação por meio de sensoriamento remoto pode ser realizada combinando o modelo de estimativa da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida pela vegetação, proposto por Monteith (1972), com o modelo de eficiência de uso da luz na fotossíntese de Field et al. (1995), adaptado por Bastiaanssen & Ali (2003) (Silva et al., 2013; Silva, 2018; Braga et al., 2023).

Nesse contexto, ao examinarmos a taxa total de fotossíntese no ambiente, desconsiderando perdas como a respiração dos produtores, podemos obter a GPP. Isso proporciona uma visão mais abrangente do potencial de produção de biomassa, essencial para avaliações detalhadas dos ecossistemas (Santos & Mendonça, 2017).

As estimativas dos fluxos de carbono em florestas sazonalmente secas e a avaliação da Produtividade Primária Bruta (GPP) oferecem uma base essencial para compreender os processos de fixação de carbono pela vegetação e os padrões de funcionamento dos ecossistemas. No contexto do Semiárido brasileiro, incluindo a Paraíba, a GPP é particularmente influenciada por fatores climáticos e práticas de manejo do solo, refletindo diretamente as condições ambientais e o uso da terra (Silva et al., 2020 & da Silva et al., 2024a). Assim, esses estudos apresentam o balanço de carbono no bioma Caatinga, com destaque para técnicas de sensoriamento remoto, complementam análises como as da GPP, ao fornecerem uma perspectiva ampliada sobre o funcionamento ecológico e os fluxos de carbono em regiões semiáridas. Essas abordagens integradas permitem uma visão mais abrangente para abordar as dinâmicas ambientais locais e regionais.

Trabalhos como (de Souza et al. 2022; de Oliveira et al. 2022; dos Santos et al. 2023) que utilizam dados de satélite (como MODIS e Landsat) mostram que, em anos de seca severa,

a redução da GPP é ainda mais acentuada, comprometendo o balanço de carbono e a resiliência do ecossistema. Eles têm demonstrado que a variação sazonal de precipitação é um dos fatores mais determinantes para a GPP na Paraíba.

A vegetação da Caatinga apresenta uma relação direta com as chuvas, tendo um aumento na GPP durante a estação chuvosa, enquanto na estação seca ocorre uma redução drástica. Modelos como o MOD17A2H, que estima a GPP a partir de dados do sensor MODIS, têm sido ferramentas valiosas para a análise de longo prazo e para avaliar o impacto das mudanças climáticas na vegetação.

Projeções apresentadas por (da Silva et al. 2024b) indicam que a Produtividade Primária Bruta na Paraíba pode sofrer impactos severos com o avanço das mudanças climáticas, especialmente com o aumento da temperatura e a intensificação de eventos extremos como secas prolongadas. A adaptação e a mitigação por meio de políticas públicas, reflorestamento e manejo sustentável do semiárido serão cruciais para minimizar esses impactos.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo

O Estado da Paraíba, localizado na região Nordeste do Brasil-NEB foi subdividido em seis (06) regiões pluviométricamente homogêneas adaptados de Brito e Braga, (2005), a saber: Litoral, Brejo, Agreste, Cariri/Curimataú, Sertão e Alto Sertão (Figura 2). Neste estudo foram utilizadas 102 estações/posto bem distribuídas no estado para o período de 2003 a 2022, perfazendo um total de 20 anos, cedidos pela AESA e INMET. Para fazer a comparação da GPP (MODIS) com a GPP estimada pelo modelo Monteith (1972), utilizou-se dados diários das cinco estações meteorológicas automáticas instaladas no estado no período 2008 a 2022.

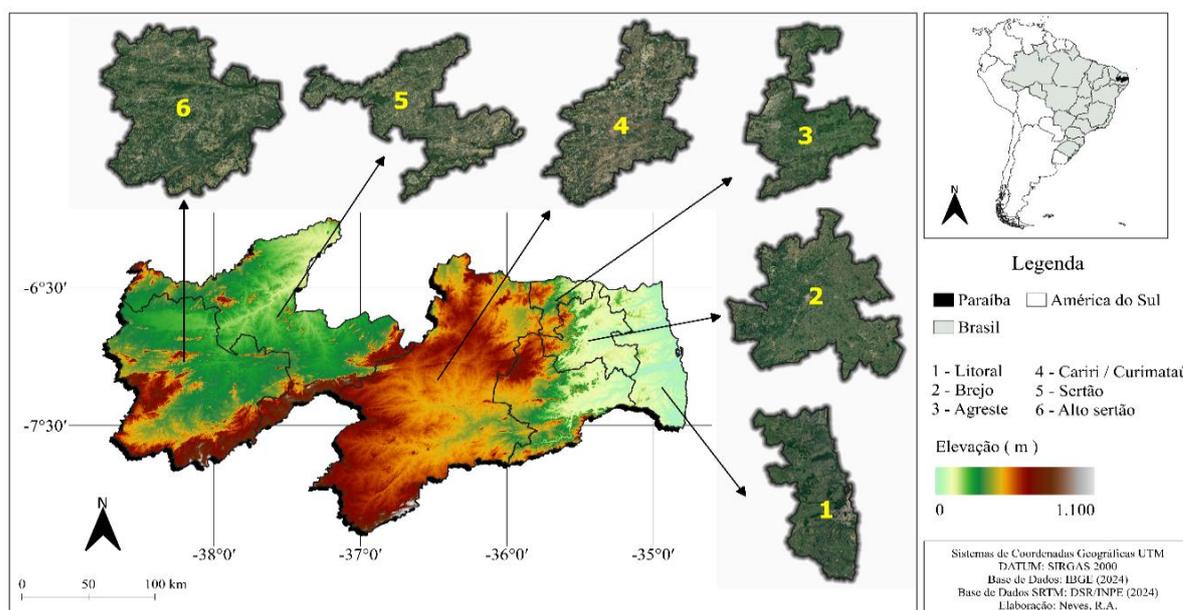


Figura 2: Mapa do Brasil, destacando o estado da Paraíba com suas respectivas regiões Pluviometricamente Homogêneas. Fonte: BRITO e BRAGA, 2005 (adaptado pela Autora, 2024).

### 4.2 Dados

Para a estimar a Produtividade Primária Bruta-GPP utilizaram-se dados do produto MOD17A2H do satélite MODIS/ Terra e do  ndice de Vegeta o por Diferença Normalizada-NDVI (MOD13A1). Eles foram adquiridos por meio da plataforma de processamento e análise de imagens de satélite Google Earth Engine Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS),

versão 6. As imagens de satélite Google Earth Engine -GEE computam e executam scripts de diversos sensores espaciais (GEE, 2017). O GEE inclui informações detalhadas sobre GPP, fornecendo valores acumulados de 8 dias com pixel de 500 metros (m), baseado no conceito de eficiência de uso de radiação (NASA EOSDIS, 2015). Em seguida, foram selecionadas cinco estações meteorológicas, distribuídas no estado da Paraíba. Para o cálculo da GPP pelo método Monteith (1972), utilizaram-se os dados de temperatura do ar e radiação global, que possuem resolução temporal horária e são, posteriormente, convertidos em médias diárias. Esses dados estão disponíveis no site do INMET (<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>), para o período referente a 2008-2022, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Dias específicos, selecionados para a obtenção dos dados meteorológicos.

Dia Juliano	Mês	Dia do Mês	Dia Juliano	Mês	Dia do Mês
17	Janeiro	17	193	Julho	12
49	Fevereiro	18	225	Agosto	13
81	Março	22	257	Setembro	14
113	Abril	23	289	Outubro	16
145	Maio	25	321	Novembro	17
177	Junho	26	353	Dezembro	19

Fonte: Autora, 2024.

Os dados de fluxo de calor latente e sensível, foram extraídos do produto ERA5-Land Daily Aggregated - Reanálise Climática do ECMWF (Muñoz Sabater, 2019). Os pontos de referências coincidem com os pontos de estação/postos da estimativa. Para a precipitação utilizou-se dados mensais de 102 estações/postos meteorológicos bem distribuídos no Estado da Paraíba, do período de 2003 a 2022, perfazendo um total de 20 anos (Figura 3).

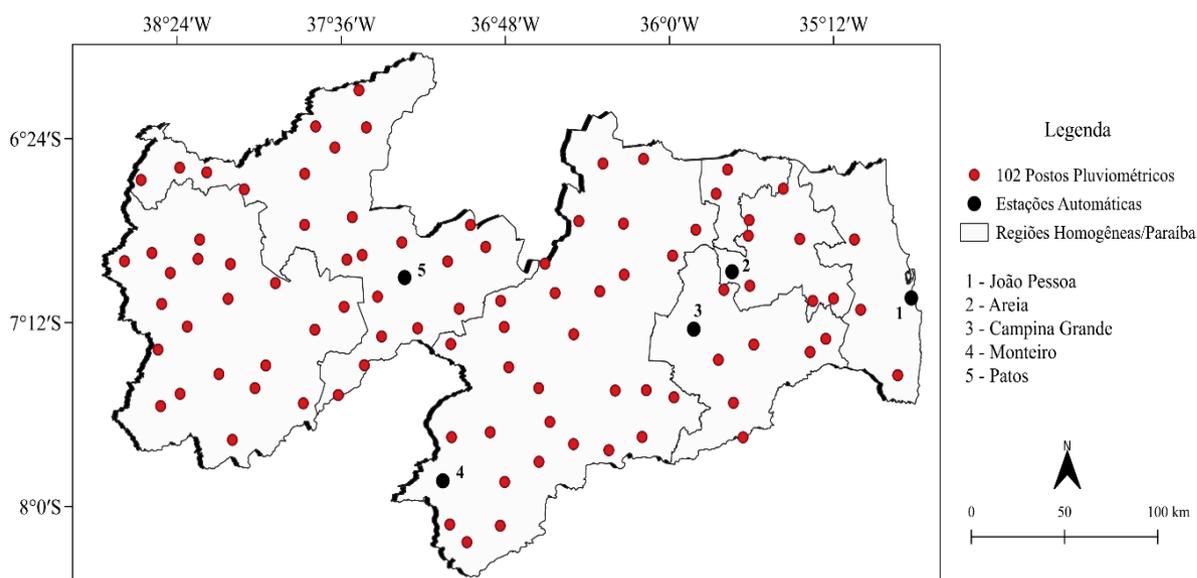


Figura 3: Espacialização dos 102 postos especificando as cinco estações meteorológicas nas regiões do Estado da Paraíba. Fonte: Autora, 2024.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) produto MOD13A1, este índice oferece informações de Índice de Vegetação (IV) por pixel, possui resolução espacial de 500 metros (m). E além do NDVI, fornece também Índice de Vegetação Aprimorado (EVI). O algoritmo desse produto seleciona o melhor valor de pixel disponível, considerando critérios como baixa cobertura de nuvens, baixo ângulo de visão e o 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).

### 4.3 Metodologia

Na primeira etapa do estudo calculou-se a variabilidade espaço-temporal da GPP no Estado da Paraíba com dados obtidos diretamente pela plataforma GEE. Numa segunda etapa a metodologia utilizada para estimar a GPP foi elaborada a partir do modelo proposto por Monteith (1972), e aplicado por autores como: Silva et. al (2013), Braga (2013), Silva (2018), onde o cálculo da GPP envolve a eficiência de uso da luz ( $\epsilon$ ), radiação Fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação (RFAA), índice de vegetação, usando dados dos produtos MODIS/Terra e dados medidos por estações meteorológicas, conforme descrito na Figura 4.

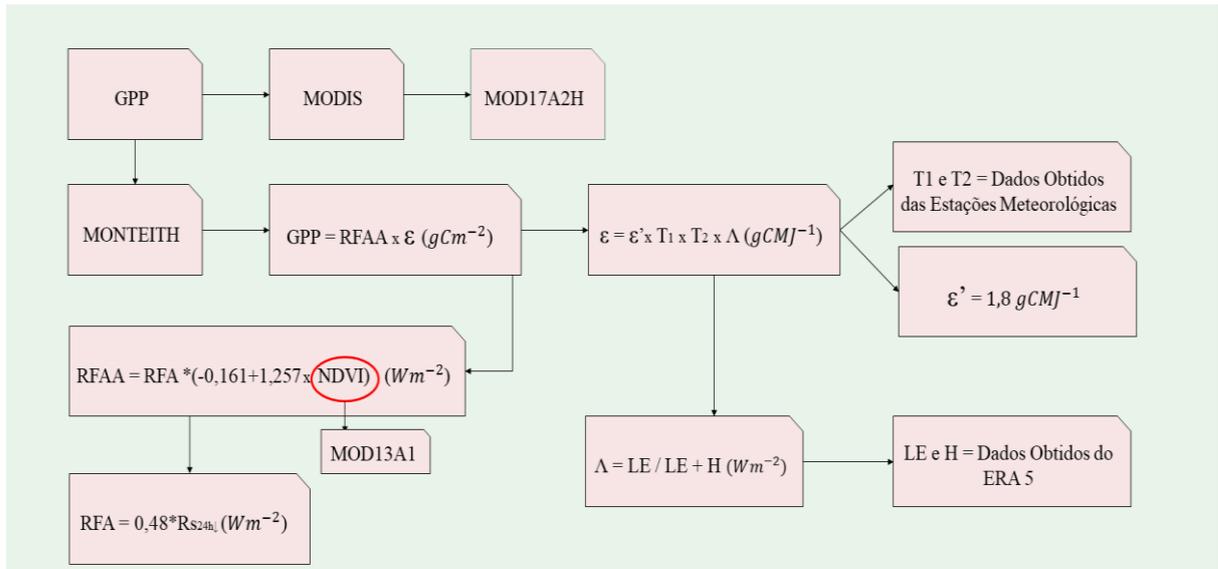


Figura 4: Fluxograma referente ao procedimento metodológico do estudo. Fonte: Autora, 2024.

Assim, a GPP obtido pelo método de Monteith é dada pela seguinte expressão:

$$GPP = RFAA \times \epsilon \quad (gCm^{-2}) \quad (1)$$

RFAA: Radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação ( $Wm^{-2}$ )

$\epsilon$ : Eficiência do uso da luz da vegetação ( $gCMJ^{-1}$ )

Nessa equação, RFAA representa a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação, da qual é a fração da RFA que realmente é absorvida pelos pigmentos fotossintéticos das plantas, principalmente pela clorofila. Ou seja, é a luz que as plantas capturam e usam de fato para a fotossíntese. A fração da radiação RFA absorvida pela vegetação pode ser expressa em relação ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), conforme posto por Daughtry et al. (1995). Essa abordagem tem sido empregada em diversos estudos, incluindo trabalhos de Runni et al. (2004) e Bastiaanssen & Ali (2003):

$$RFAA = RFA \times (-0,161 + 1,257 \times NDVI) \quad (Wm^{-2}) \quad (2)$$

A RFA (Radiação Fotossinteticamente Ativa) pode ser estimada e relacionada à radiação solar global diária, conforme proposto por Bastiaanssen e Ali (2003),

$$RFA = 0,48 \times R_{s24h\downarrow} \quad (Wm^{-2}) \quad (3)$$

onde  $R_{s24h\downarrow}$  a radiação solar global diária no período de 24 horas.

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

$$\epsilon = \epsilon' \times T_1 \times T_2 \times \Lambda \quad (4)$$

$\epsilon'$ : eficiência máxima de uso da luz pela vegetação igual a  $1,8 \text{ gCMJ}^{-1}$  Ibrahim (2006),

$T_1$  e  $T_2$ : contribuição da temperatura na eficiência de uso da luz pelas plantas

$\Lambda$ : 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 ( $^{\circ}\text{C}$ ) do mês de máximo NDVI

$T_{dia}$ : temperatura média diária do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ).

A Fração evaporativa  $\Lambda$  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). No SEBAL se obtém a densidade do fluxo de calor latente - LE ( $\text{Wm}^{-2}$ ) como resíduo do balanço de energia à superfície, qual seja:

$$LE = R_n - G - H \quad (\text{Wm}^{-2}) \quad (7)$$

em que  $R_n$  ( $\text{Wm}^2$ ) é o saldo de radiação,  $G$  ( $\text{Wm}^2$ ) é a densidade do fluxo de calor no solo e  $H$  ( $\text{Wm}^2$ ) 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 foi corroborada pelos achados apresentados por Brutsaert & Sugira (1992), em que esses indicadores podem ser expressos como a razão entre os fluxos de calor latente e a soma deste com o fluxo de calor sensível, como podemos observar,

$$\Lambda = \frac{LE}{R_n - G} = \frac{LE}{LE + H} \quad (\text{Wm}^{-2}) \quad (8)$$

na equação acima,  $\Lambda$  representa a fração evaporativa,  $LE$  é o fluxo de calor latente,  $Rn$  é o saldo de radiação,  $H$  é o fluxo de calor sensível, e  $G$  é o fluxo de calor no solo.

#### 4.3.1 Análise estatística

Para estabelecer a relação entre as variáveis estimadas provenientes do produto do sensor MODIS/Terra e as estimadas pelo Monteith (1972) através de dados de estações meteorológicas, empregaram-se indicadores estatísticos tais como Erro Médio Absoluto (EMA), Erro Percentual Absoluto Médio (EPAM) e Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM). As fórmulas desses indicadores, conforme descritas por Wilks (2006), são as seguintes:

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (x - y)^2}{n}} \quad (9)$$

$$EMA = \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{n} \quad (10)$$

$$EPAM = \frac{\sum_{i=1}^n |EP|}{n} \quad (11)$$

$x$ : variáveis observadas ;  $y$ : variáveis simuladas a partir da metodologia proposta;  $n$ : número de observações;  $|EP|$ : é o valor absoluto do erro de previsão para os dados observados.

Calculou-se, ainda, o coeficiente de Correlação Linear de Person ( $r$ ) e seu Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) (WILKS, 2006).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2][\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2]}} \quad (12)$$

Assim como também foi calculado o índice de Willmoth em que  $N$  é o número de observações,  $S_i$  é o simulado e  $O_i$  o observado (Willmott et al. 1985).

$$I = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (13)$$

## 5 RESULTADO E DISCUSSÃO

### 5.1 Climatologia do Estado da Paraíba

A Paraíba, localizada no Nordeste do Brasil, possui uma área de 56.340,9 km<sup>2</sup> e é dividida em seis regiões homogêneas: Litoral, Brejo, Agreste, Cariri/Curimataú, Alto sertão e Sertão (Brito & Braga, 2005; 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 pelas frentes frias que se soltam da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e formam na zona de convergência Leste do NEB, outro fator são os ventos alísios e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) (Molion & Bernardo, 2000; Souza et. al, 2022; Medeiros, 2024). A representação da climatologia pode ser observada na figura 5.

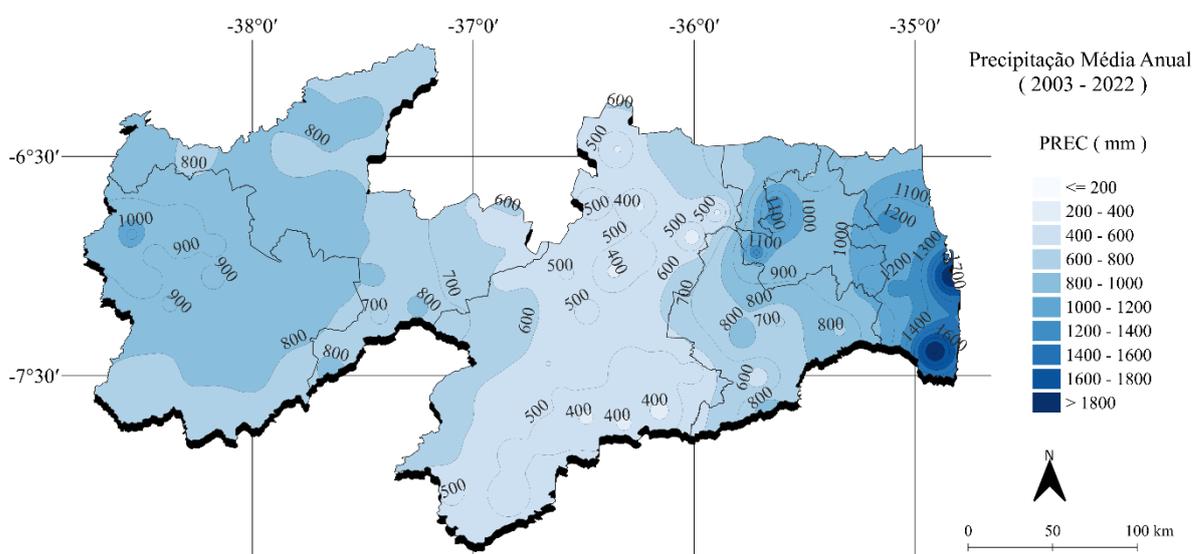


Figura 5: Totais médios anuais de precipitação no período de 2003 até 2022. Fonte: Autora, 2025.

As variações climáticas, especialmente as associadas aos fenômenos El Niño e La Niña, exercem forte influência sobre a precipitação no estado da Paraíba, destacando-se pela irregularidade espacial e temporal. Enquanto, o Litoral registra os maiores índices pluviométricos (1.200–1.800 mm anuais), o Sertão e o Cariri enfrentam os menores (300–600 mm), intensificando os desafios no semiárido. Essa distribuição desigual impacta diretamente a agricultura, sendo o Sertão caracterizado pela dificuldade na agricultura de sequeiro, enquanto o Brejo apresenta condições mais favoráveis para diversificação de cultivos. A concentração

das chuvas em períodos curtos contribui para a redução da recarga hídrica e o avanço da desertificação em regiões vulneráveis (Francisco & Santos, 2017).

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

No período de 2003 a 2022 a análise média anual do NDVI fornece informações valiosas sobre a dinâmica da vegetação e a resposta dos ecossistemas às condições climáticas ao longo do tempo. O mesmo apresentou uma variação, refletindo o impacto das estações chuvosa e seca. Em regiões semiáridas, como o Sertão e o Cariri/Curimataú da Paraíba, o NDVI tende a ter um declínio acentuado da vegetação. Nas regiões do Litoral e Brejo a variável apresenta-se mais estável e elevada, devido à maior disponibilidade hídrica e densidade de vegetação, como pode-se analisar na figura 6.

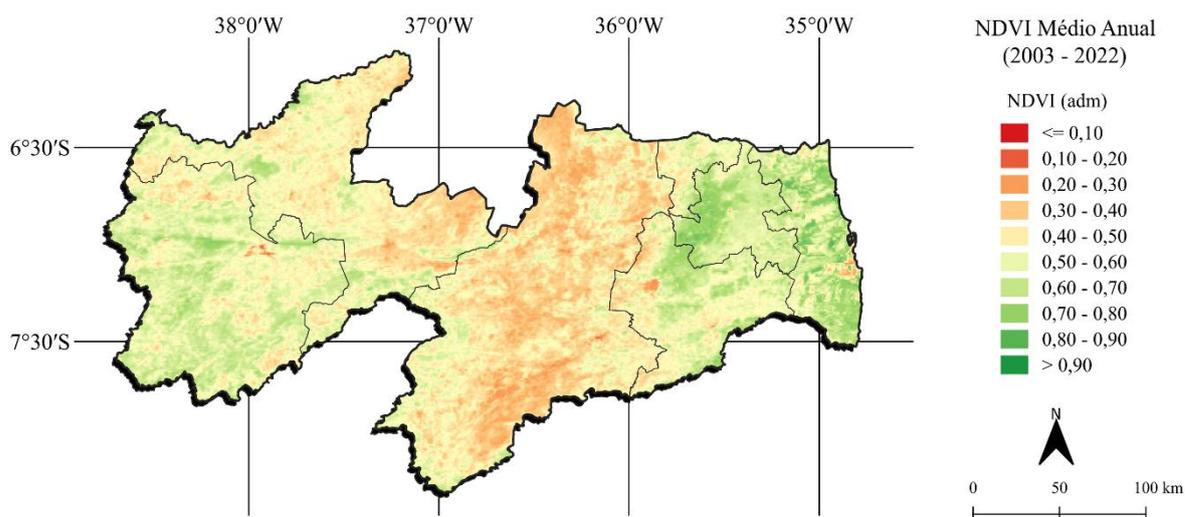


Figura 6: Média anual do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para o período de 2003 até 2022. Fonte: Autora, 2025.

O NDVI reflete a saúde da vegetação e sua capacidade de recuperação. Áreas com declínio persistente no índice podem estar enfrentando degradação ambiental e risco de desertificação (Lima et al., 2023), a exemplo da região central do estado que responde com um índice de vegetação frequentemente baixa com uma taxa variante entre 0,2 a 0,5.

Pesquisas mostram que o comportamento do NDVI é uma variável essencial para se avaliar a resiliência dos ecossistemas diante de eventos climáticos extremos e para 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, como o Sertão da Paraíba, à 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 (Costa, 2024).

### 5.3 Média anual da Produtividade Primária Bruta (GPP)

O estudo da Produtividade Primária Bruta (GPP) para o período de 2003 a 2022 revela padrões regionais distintos, intimamente ligados às variações climáticas e aos regimes de precipitação das diferentes regiões do estado da Paraíba. A Produtividade Primária Bruta, que representa a capacidade da vegetação de fixar carbono atmosférico através da fotossíntese, é influenciado principalmente pela disponibilidade de água, radiação solar e condições ambientais específicas indicando que a mesma está fortemente correlacionada com a variabilidade das chuvas (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). Representado pela Figura 7.

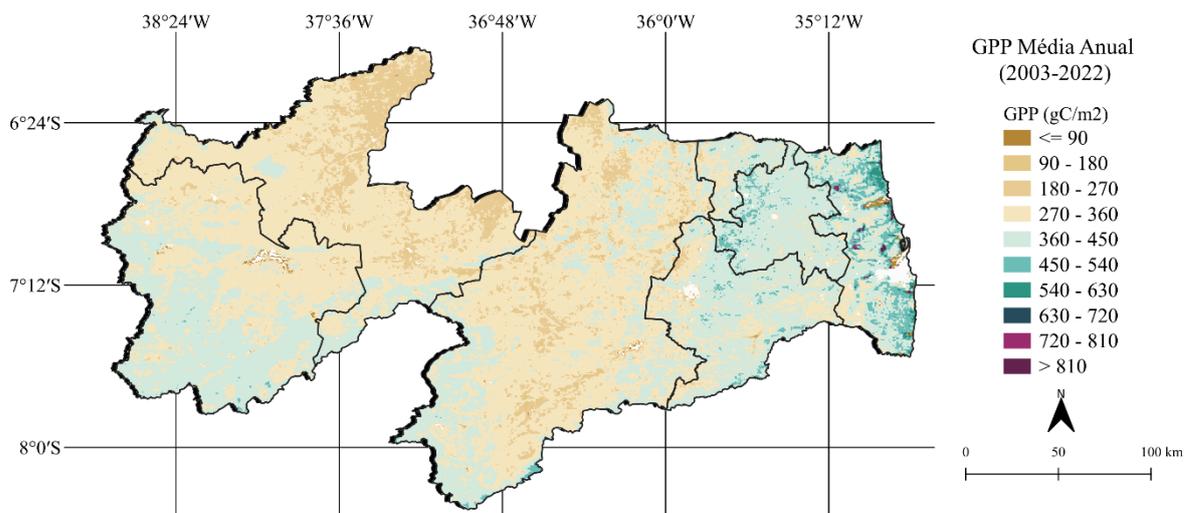


Figura 7: Média anual da Produtividade Primária Bruta (GPP) para o período de 2003 até 2022. Fonte: Autora, 2025.

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).

#### **5.4 Análise espacial e sazonal da PREC, GPP e NDVI**

Os resultados da Produtividade Primária Bruta (GPP) e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) obtidos pela da Plataforma GEE e dados da precipitação são observados para o período de 2003 a 2022 no o estado da Paraíba. Estudos realizados por vários pesquisadores reportaram que as chuvas na região NEB, em especial as 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 o Sertão e região central, que sofre com a recorrência de secas prolongadas (Nimer, 1972; Hastenrath & Greishar, 1993; Molion & Bernado 2002; Braga et al., 2014).

A Figura 8, mostra a variabilidade sazonal da precipitação para o verão nas RHs - Sertão e Alto Sertão, apresentando totais médios sazonais entre 80 e 200 mm, com maior concentração de chuva no alto Sertão, como observado na Figura 8, marcando o período de pico das chuvas neste trimestre. Estudos como: Sousa & Moura, (2021); Araújo & Andrade, (2020), apresentam 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 resto do ano. Já a resposta da GPP (Produtividade Primária Bruta) é mais intensa e abrangente no trimestre seguinte, outono, (Figura 9). O NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) que também reflete a influência positiva do período chuvoso, com sua evolução acompanhando 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 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, sendo uma das regiões mais afetadas pela falta de chuvas (Ives & Nóbrega, 2021; Silva & Sousa, 2020; Silva & Oliveira, 2022). Como pode-se observar nas Figuras 8 e 9 esta região é afetada pelas atuações dos 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 se estendendo ao início do inverno, que variam de 40 a 100 mm com base nas Figuras 8, 9 e 10, 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, que é 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 significativos respondendo a estação chuvosa da região, conseqüentemente ocorrendo o mesmo com a GPP, Figuras 9 e 10.

A região do Brejo paraibano, possui um regime de chuvas diferenciado em comparação com outras áreas do estado, propiciado pela sua topografia de altitude elevada e características ambientais particulares, tipo de vegetação, solo, topografia, dentre outras. Ela está situada na zona de transição entre o agreste e 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 das ondas de leste, que trazem umidade do Oceano Atlântico e causam precipitações (Carvalho & Souza, 2022). Em anos El Niño e La Niña o regime de chuvas da região também é influenciado por esses fenômenos globais (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 e por isso pode-se observar que o NDVI e a GPP estão associadas e com isso apresenta índices significativos durante todas as estações, Figuras 9 a 11, o que já é esperado.

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, representado abaixo nas Figuras 9 e 10. Neste período, o Litoral recebe a maior parte do seu volume de chuvas, devido à influência das frentes frias e ondas de leste, que trazem umidade do Oceano Atlântico (Ferreira, & Moura, 2021; Andrade, & Lima, 2022). Por isso, observa-se que o NDVI é bem expressivo durante todo o ano, pois a vegetação permanece verde. Consequentemente, a GPP acompanha o desenvolvimento da vegetação variando sazonalmente entre 100 a 200 ( $gC/m^2$ ). Salienta-se o tipo de cobertura vegetal do Litoral é de grande porte, pois mesmo em períodos secos, ela retira umidade do solo, permanecendo verde praticamente o ano todo (Braga, 2000).

Enfim, a vegetação predominante do agreste é composta por 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 do Brejo ou 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 9 e 10, e uma rápida redução quando a água se torna limitada, tendo resposta ainda na primavera, Figura 11 resultado 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, o que se reflete diretamente no comportamento do NDVI (Ferreira, & Almeida, 2023). O índice está fortemente associado com a estação chuvosa, que ocorre entre outono e inverno, atingindo valores mais altos e a estação seca (primavera ao verão), chegando a valores próximo de zero.

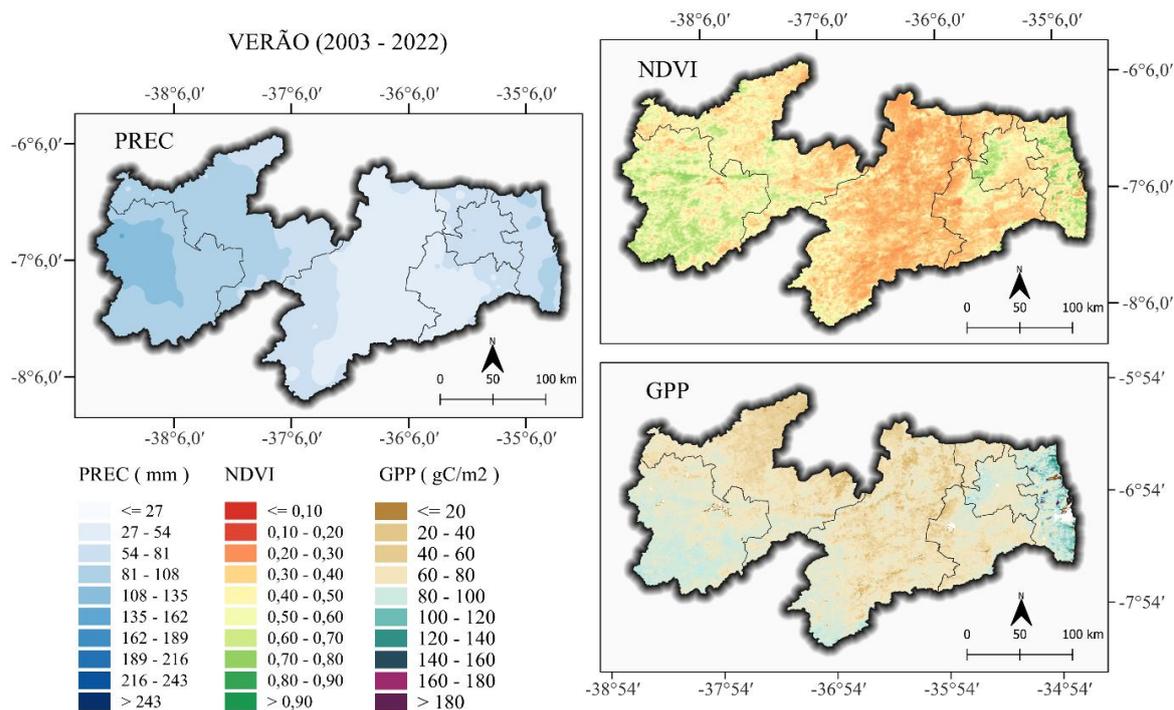


Figura 8: Média sazonal do verão para as variáveis de NDVI, GPP e PREC. Fonte: Autora, 2025.

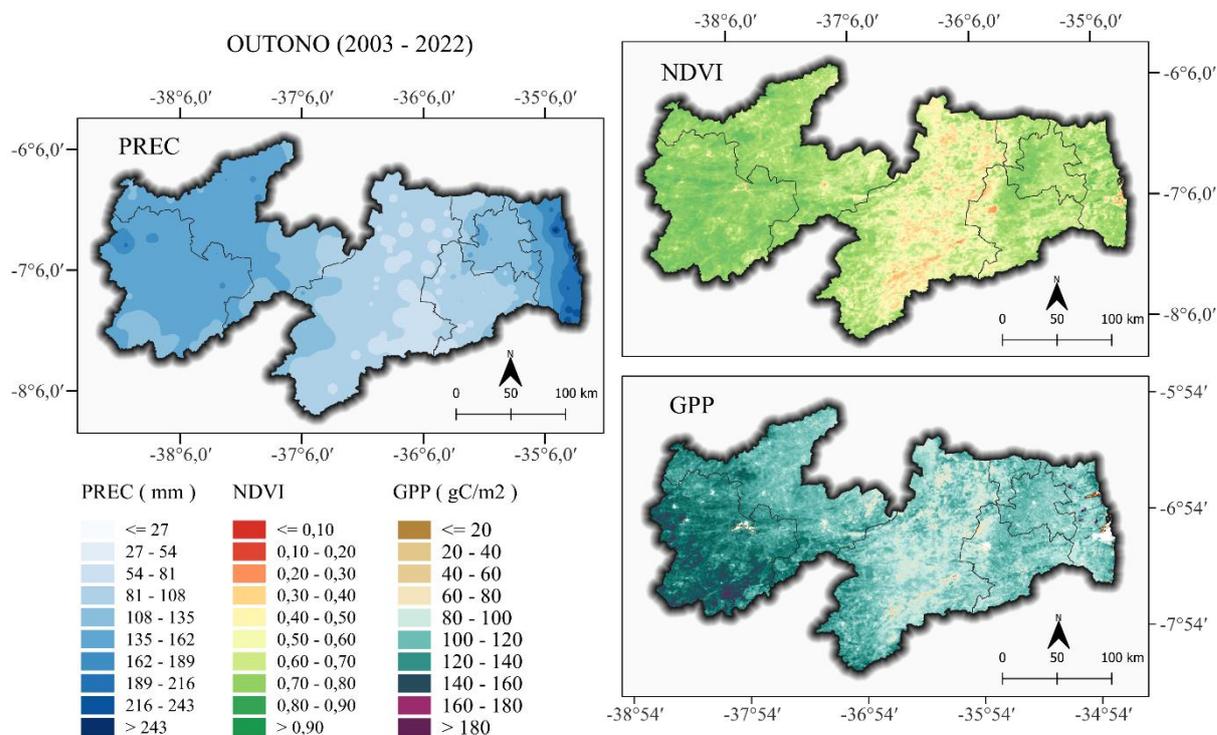


Figura 9: Média sazonal do outono para as variáveis de NDVI, GPP e PREC. Fonte: Autora, 2025.

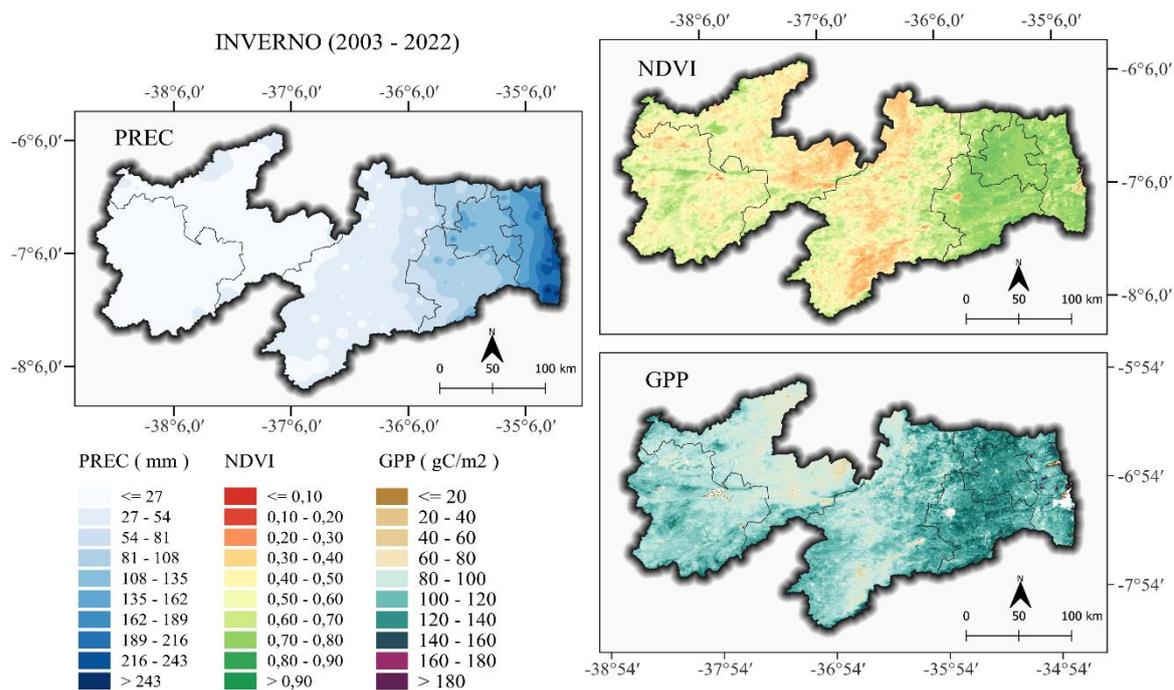


Figura 10: Média sazonal do inverno para as variáveis de NDVI, GPP e PREC. Fonte: Autora, 2025.

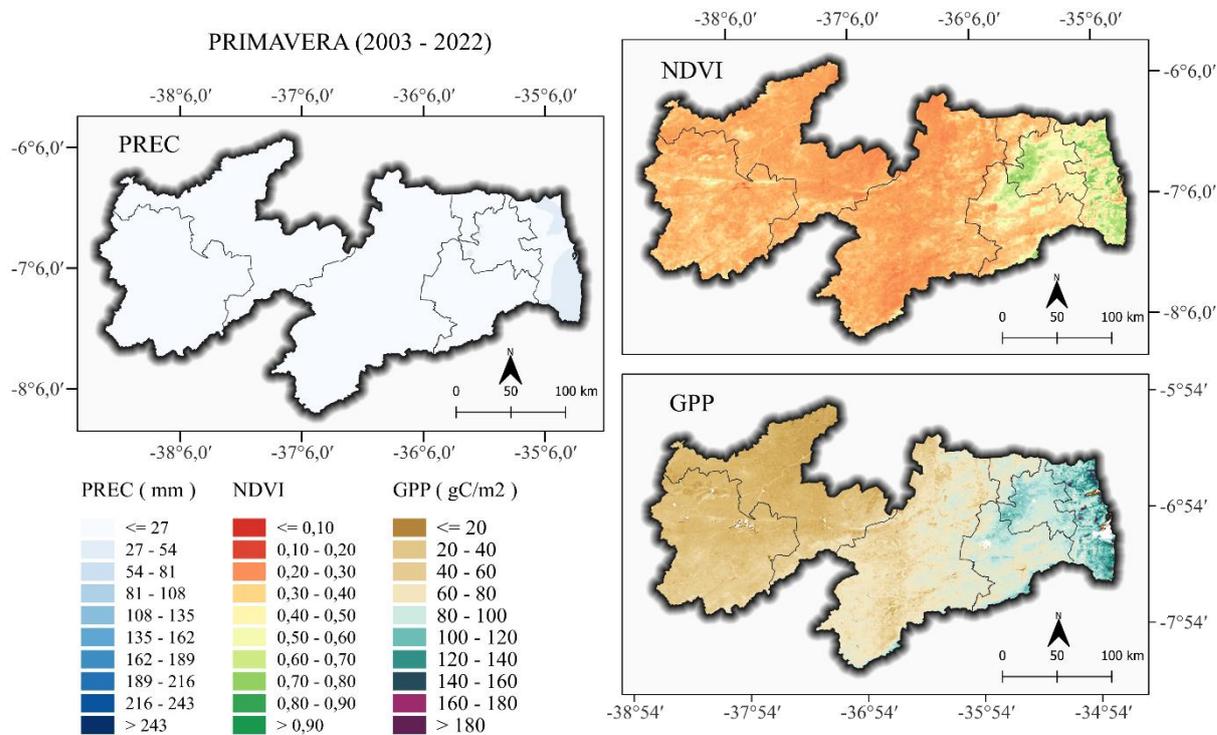


Figura 11: Média sazonal da primavera para as variáveis de NDVI, GPP e PREC. Fonte: Autora, 2025.

## **5.5 Regiões Homogêneas do Estado da Paraíba**

### **5.5.1 Precipitação do Estado da Paraíba**

A Figura 12 ilustra a variabilidade dos totais médios mensal da precipitação no período de 20 anos (2003 a 2022), para cada uma das regiões homogêneas da precipitação do estado da Paraíba. Os maiores valores da precipitação são registrados na região RH-1 no Litoral no trimestre maio, junho e julho, com pico máximo 302 mm no mês de junho. E menores valores no trimestre de outubro, novembro e dezembro, com mínimo em novembro. Nesta região são influenciadas principalmente, pela atuação dos sistemas de lestes tais como brisas e ondas de leste (Brito & Braga, 2005; Braga et al. 2014). No entanto, a região na RH4 (Cariri/Curimataú) é caracterizada por apresentar os menores índices pluviométricos do estado, com trimestre mais chuvoso nos meses de março, abril e maio com máximo de 93 mm em março e o menor 3,44 mm em setembro.

As regiões RH5 e RH6 localizadas no Sertão e Alto Sertão apresentam um regime de chuvas semelhante, com maiores índices pluviométricos no trimestre fevereiro, março e abril, com máximos de precipitação de 183 mm e 214 mm e mínimos em setembro respectivamente. Essas áreas, no entanto, enfrentam um longo período de estiagem de agosto a dezembro (AESAs, 2022). As chuvas do Oeste são influenciadas pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) (GAN e KOUSKY, 1986; Brito e Braga, 2005; Braga et al. 2014). As regiões do Agreste (RH-2) e Brejo (RH-3), apresentam variabilidade média mensal semelhante, com índices pluviométricos diferentes. Ambas com os maiores valores que se concentram no trimestre de maio, junho e julho, com máximo em junho e mínimos em outubro. O Brejo por sua vez se destaca por apresentar índice pluviométrico superior, devido à sua posição geográfica mais elevada, com uma diferença média da ordem de 50 mm em junho (Figura 12).

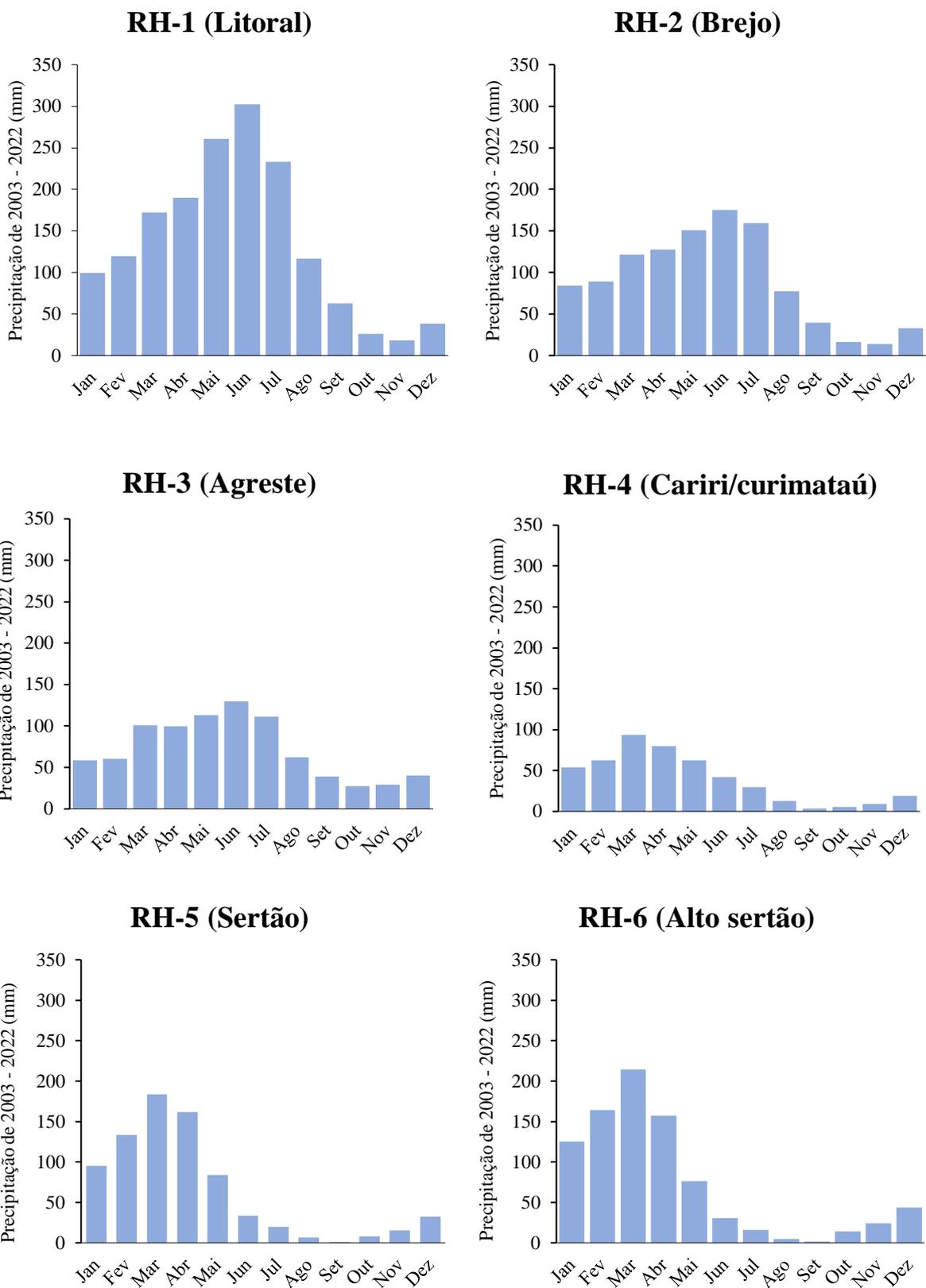


Figura 12: Totais mensais de precipitação para o período de 2003 a 2022 nas seis regiões homogêneas do Estado da Paraíba. Fonte: Autora, 2025.

## 5.6 Relação Funcional entre GPP MODIS/Terra e o método Monteith (1972)

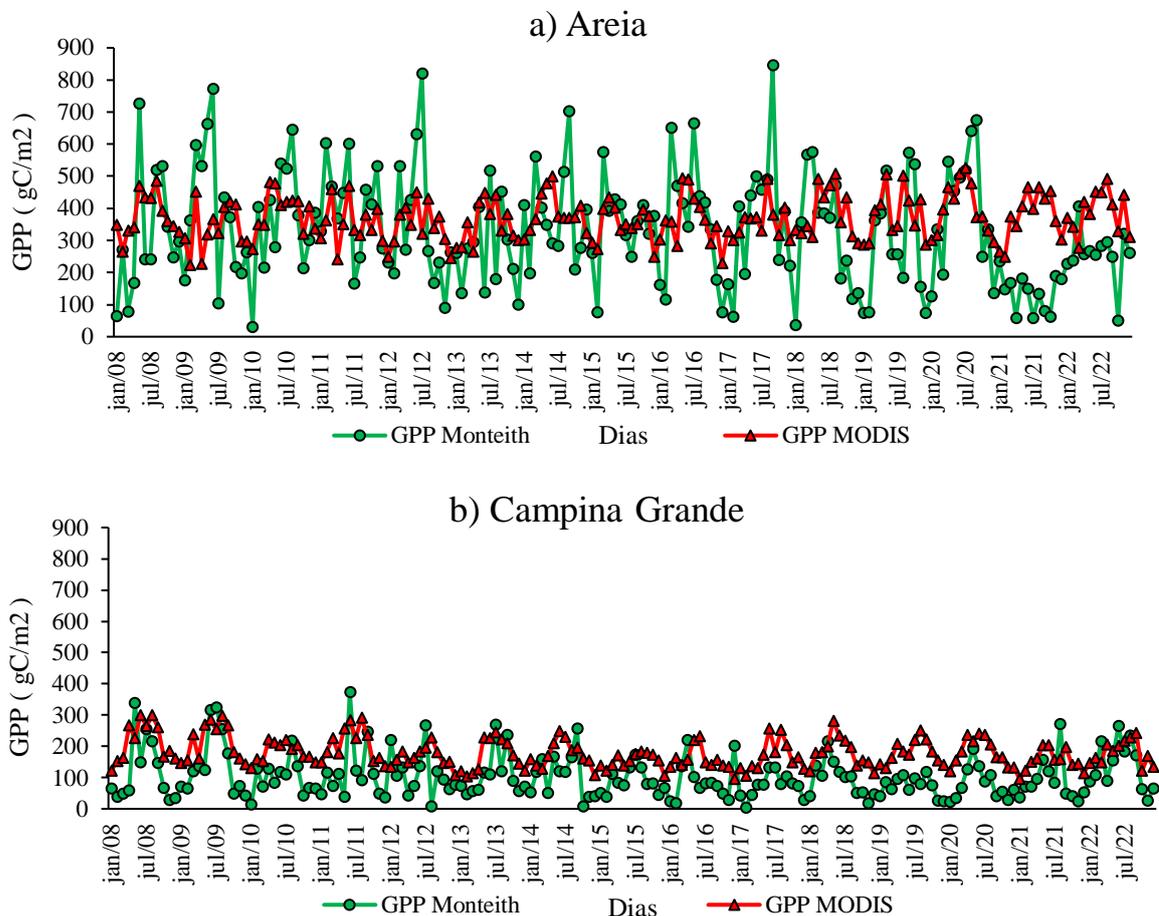
Na Figura 13, observam-se a variabilidade temporal entre dois métodos de estimativa de produtividade primária bruta (GPP), Monteith e MODIS, para cinco cidades: Areia, Campina Grande, João Pessoa, Monteiro e Patos, ao longo do período de 2008-2022. Na figura 13a, a cidade de Areia mostra valores com variações entre o máximo de 845,6 gC/m<sup>2</sup> e mínimo próximo a 30 gC/m<sup>2</sup> e média de 438 gC/m<sup>2</sup>, para o método Monteith, já os dados do MODIS na média gira em torno de 366 gC/m<sup>2</sup>, com um máximo de aproximadamente 500 gC/m<sup>2</sup> e mínimo próximo a 220 gC/m<sup>2</sup>, apresentando uma média levemente inferior à do Monteith. Na figura 13b referente a cidade de Campina Grande, os valores médios são em torno de 188 gC/m<sup>2</sup>, com valores máximos que atingem 373 gC/m<sup>2</sup> e mínimos em torno de 3,53 gC/m<sup>2</sup> no método Monteith, já os do MODIS, média de cerca de 197 gC/m<sup>2</sup> e valores máximos levemente inferiores, atingindo 300 gC/m<sup>2</sup>, com os mínimos de 95 gC/m<sup>2</sup>. Visivelmente a diferença entre os métodos é sutil, entretanto o Monteith apresenta mais picos de variações da GPP.

Para João Pessoa (Figura 13c), média de 454 gC/m<sup>2</sup>, com máximos de 861 gC/m<sup>2</sup> e mínimos de 47 gC/m<sup>2</sup> pelo Monteith e aproximadamente de 193 gC/m<sup>2</sup> (média), com máximos 269 gC/m<sup>2</sup> e mínimos próximos a 116 gC/m<sup>2</sup> pelo MODIS. Monteiro (Figura 13d) apresenta médias de aproximadamente 370 gC/m<sup>2</sup>, com máximos de 735 gC/m<sup>2</sup> e mínimos próximos de 6 gC/m<sup>2</sup>, pelo método Monteith, e de 349 gC/m<sup>2</sup> (média), com máximos de 592 gC/m<sup>2</sup> e mínimos de 108 gC/m<sup>2</sup> pelo MODIS. E por fim, A cidade de Patos (Figura 13e), onde o método Monteith expôs médias de 566 gC/m<sup>2</sup>, máximos maiores que 900 gC/m<sup>2</sup> (1.029,00; 1.061,86; 1.126,69) e mínimos de 6,42 gC/m<sup>2</sup>, e o MODIS médias em torno de 337 gC/m<sup>2</sup>, máximos de 617 gC/m<sup>2</sup> e mínimos de 56 gC/m<sup>2</sup>.

De uma forma geral, o método Monteith se mostrou mais sensíveis as variações temporais da GPP em todas as cidades como observado nas figuras 13a a 13e. O método MODIS manteve um padrão de variações suaves, o que pode ser considerado como estimativas mais estáveis. Baseado no tipo de estudo de interesse pode-se escolher qual dos métodos é o mais adequado. Neste caso, o método Monteith mostrou ser potencialmente mais eficaz em captura de picos de produtividade, enquanto o MODIS pode ser preferido em situações em que a robustez e estabilidade são prioridades. Custodio (2021), em seus estudos fez uma análise comparativa entre métodos de obtenção da GPP para o Nordeste brasileiro, constatando que a GPP MODIS e GPP EVI confrontadas com a GPP Torre do sítio de Serra Talhada (estação), na Caatinga, foram estatisticamente diferentes e as que apresentaram os maiores erros, enquanto o

GPPmedido não registrou diferenças significativas e os erros foram menores. Isso, corrobora com as respostas encontradas nesta pesquisa.

As diferenças entre os métodos podem estar relacionadas a forma de obtenção e processamento do resultado. Uma vez que a GPP Monteith, é baseado no modelo de eficiência do uso de luz, utilizando variáveis como radiação solar e temperatura (Monteith, 1972; Da Silva et al., 2021), sendo um método mais direto, sensível a fatores como mudanças na radiação disponível e na eficiência de conversão de energia pela vegetação. Já o GPP MODIS, utiliza dados de sensoriamento remoto do satélite MODIS, levando em consideração a reflectância da vegetação, o índice de vegetação (NDVI) e outros fatores derivados da observação por satélite (Running & Zao, 2015). A resolução espacial também pode ser um fator que influencia na resposta final, visto que o MODIS possui uma baixa resolução espacial comparado com os dados de estações meteorológicas que são pontuais. Em outras palavras, o MODIS oferece dados globais, mas sua resolução espacial e temporal pode não capturar microclimas locais ou pequenas variações sazonais. Já o Monteith (1972) é mais específico para cada localidade, mas sua dependência de dados climáticos locais pode aumentar a variabilidade.



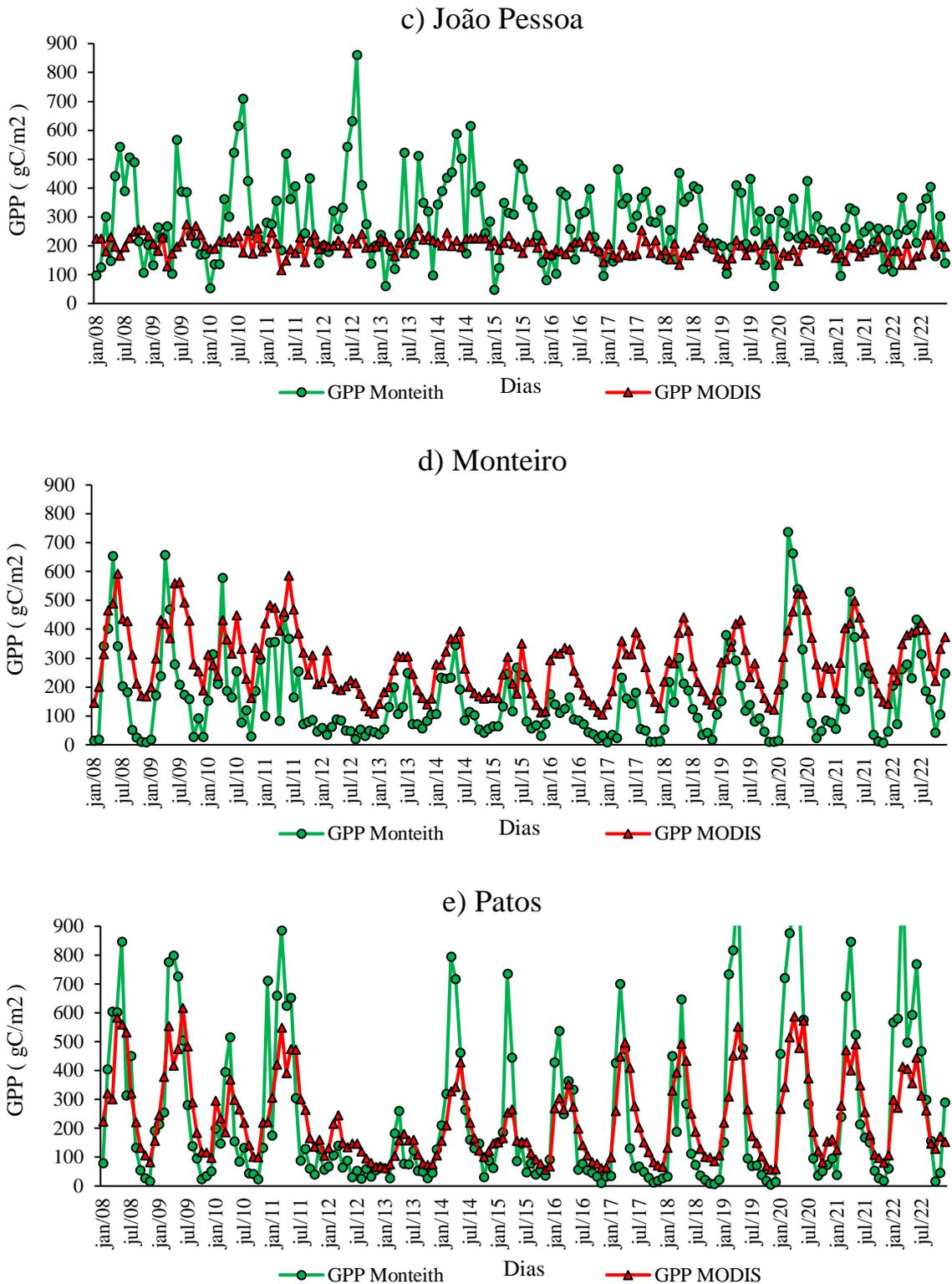
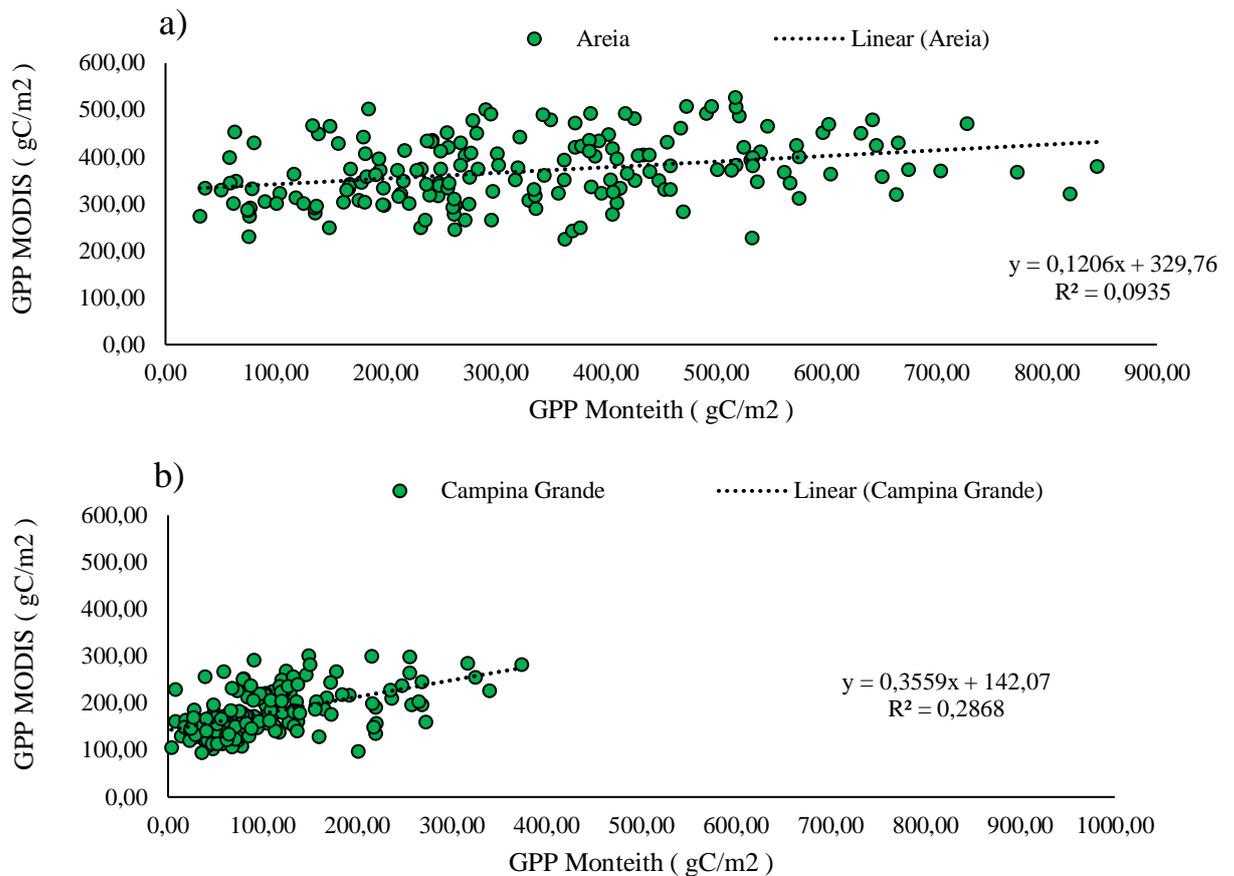


Figura 13: Variabilidade temporal entre métodos de estimativa de produtividade primária bruta (GPP), para cinco localidades: a) Areia-PB, b) Campina Grande-PB, c) João Pessoa-PB, d) Monteiro-PB e e) Patos-PB, para o período de 2008-2022. Fonte: Autora, 2025.

A figura 14 expõe os valores de  $R^2$  obtidos indicando os diferentes graus de ajuste entre os métodos avaliados para a estimativa da GPP. A Cidade de Patos (Figura 14e) apresentou o maior coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,673$ ), sugerindo que os métodos utilizados conseguem representar de maneira mais consistente a variabilidade da GPP na região. Monteiro (figura 14d) também demonstrou um coeficiente considerável ( $R^2 = 0,5073$ ), embora inferior ao de Patos. A semelhança climática entre as duas cidades pode justificar a melhor adequação dos modelos aplicados a essas regiões. Em contraste, Campina Grande ( $R^2 = 0,2866$ ) e Areia ( $R^2 = 0,0935$ ) (figuras 14b e 14a, respectivamente) apresentaram coeficientes mais baixos, sugerindo maior variabilidade nas estimativas. Já João Pessoa (figura 14c) apresentou o menor coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,013$ ), indicando maior discrepância entre os métodos avaliados. Os resultados sugerem que cidades localizadas em regiões semiáridas (Patos e Monteiro) apresentam estimativas mais consistentes da GPP, onde podem estar associados à menor variabilidade climática e à menor interferência de fatores urbanos nesses locais.



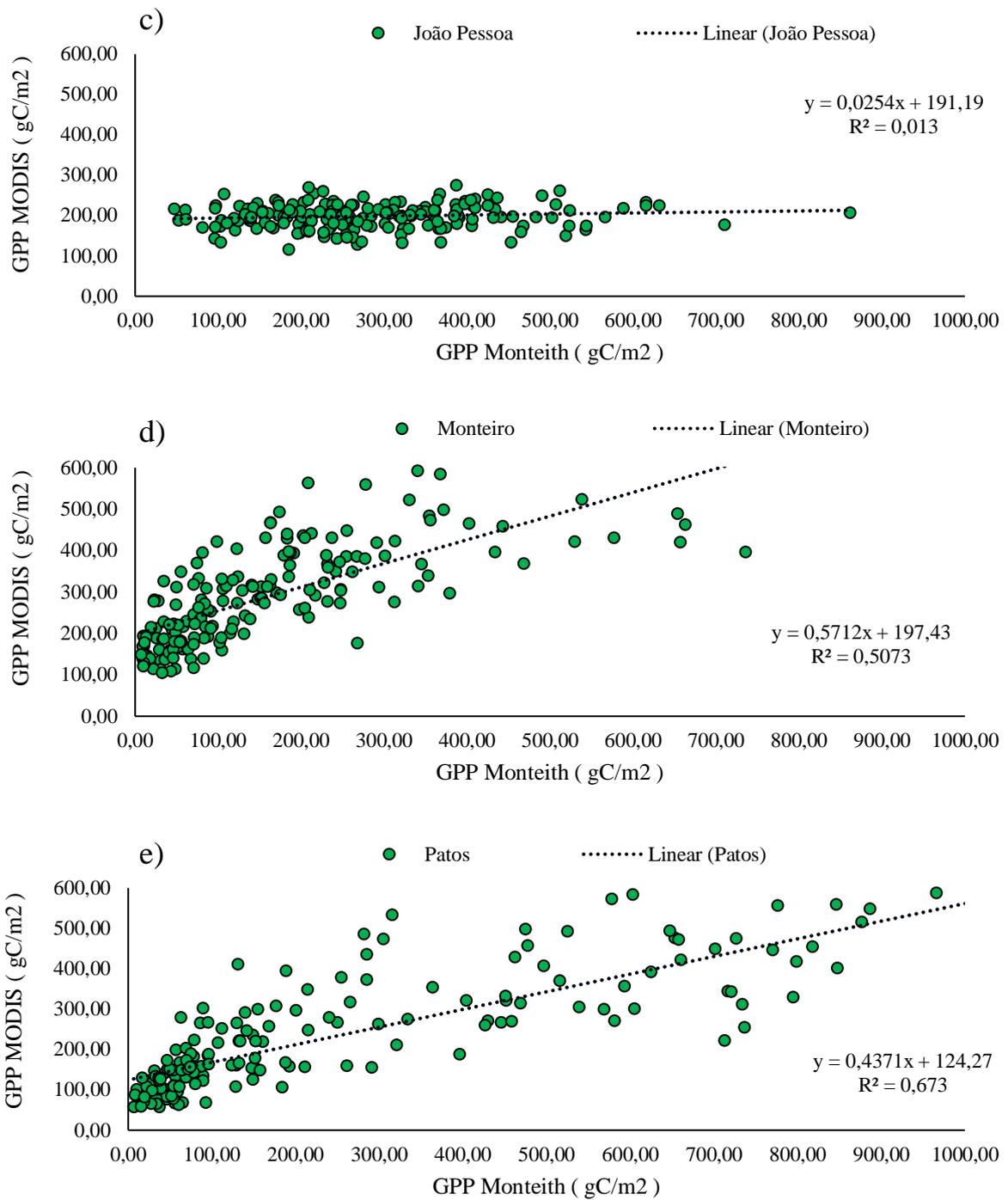


Figura 14: Diagrama de dispersão e curva de correlação entre os Métodos de obtenção da GPP MODIS e Monteith para as cinco localidades: a) Areia-PB, b) Campina Grande-PB, c) João Pessoa-PB, d) Monteiro-PB e e) Patos-PB no período de 2008-2022 no estado da Paraíba. Fonte: Autora, 2025.

Na tabela 2, são observadas as análises de métricas estatísticas que comparam a (GPP) via Método Monteith e os dados MODIS para diferentes cidades paraibanas (Areia, Campina Grande, João Pessoa, Monteiro e Patos). A cidade de Monteiro-PB se destaca sendo a cidade com os melhores resultados em termos de correlação de Pearson ( $r = 0,71$ ) e índice de Willmoth ( $I = 0,96$ ), indicando uma alta correspondência entre os dois métodos analisados. O alto valor de correlação sugere que os dois métodos capturam bem as variações da GPP nessa cidade. Seguido de Patos-PB que apresentou a maior correlação, sendo uma correlação muito alta ( $r = 0,81$ ) e um bom índice de Willmoth ( $I = 0,50$ ), o que sugere uma alta confiabilidade entre os métodos. Em contrapartida, João Pessoa-PB foi a cidade com o pior valor de correlação ( $r = 0,12$ ), sugerindo uma fraca concordância entre o Método Monteith e os dados MODIS. O índice de Willmoth ( $I = 0,43$ ) também é relativamente baixo, indicando maior dificuldade em capturar corretamente as variações da GPP nessa cidade. Seguido de Areia ( $r = 0,31$ ) e Campina Grande-PB ( $r = 0,39$ ), apresentando correlações baixas e sugerindo que as variações na GPP calculadas pelos dois métodos não estão bem relacionadas.

Tabela 2: Métricas estatísticas comparando o GPP obtido via MODIS e Método Monteith 1972.

<b>Cidades</b>	<b>REQM</b>	<b>r</b>	<b>EMA</b>	<b>EPAM</b>	<b>I</b>
Areia-PB	171,72	0,31	141,15	82,94	0,42
Campina Grande-PB	96,95	0,39	87,90	186	0,85
João Pessoa-PB	163,70	0,12	124,85	44,7	0,43
Monteiro-PB	165,43	0,71	149,2	281,2	0,96
Patos-PB	174,15	0,81	126,16	122,3	0,50

Legenda: Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), Correlação de Pearson (r), Erro Médio Absoluto (EMA), Erro Percentual Absoluto Médio (EPAM), Índice de Willmoth (I). Fonte: Autora, 2025.

As cidades com altos valores de correlação (Monteiro = 0,71 e Patos = 0,81), podem estar relacionados as condições climáticas, ambientais e geográficas das cidades o que favorecem as estimativas da GPP por ambos os métodos aplicados. Já as cidades com as piores correlações (Areia = 0,31, Campina Grande = 0,39 e João Pessoa = 0,12), pode estar ligado as variações microclimáticas. Campina Grande e João Pessoa sofrem o efeito da urbanização, o

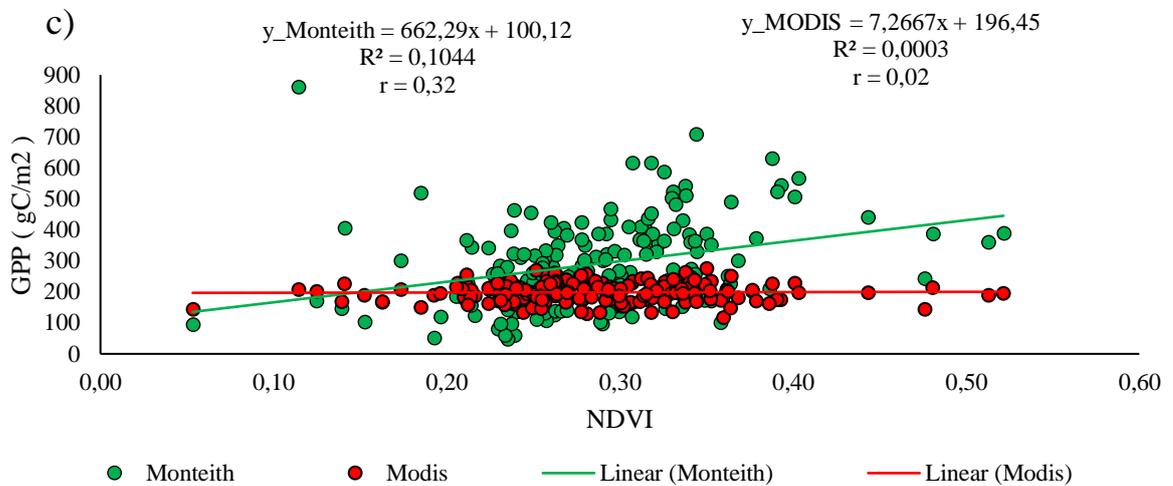
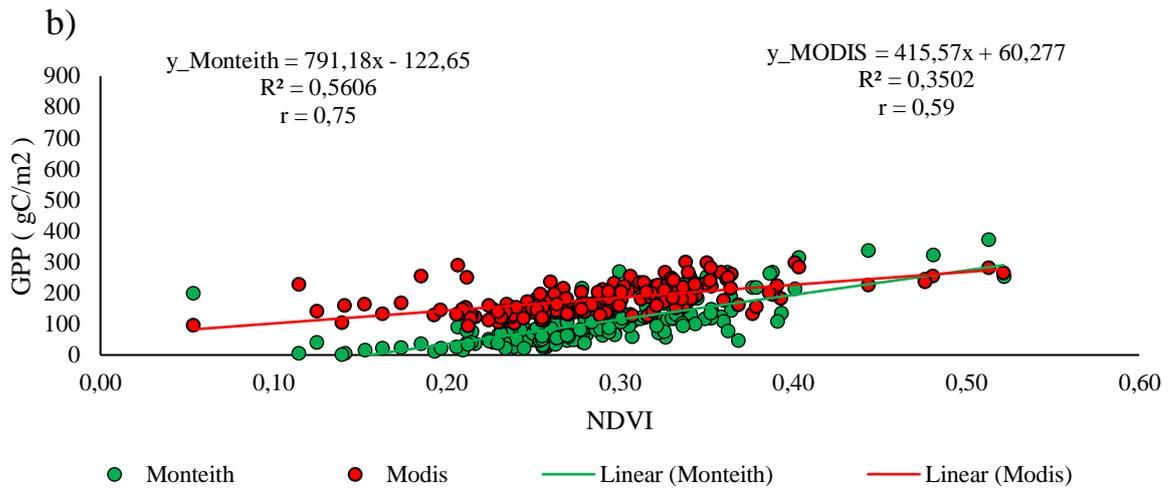
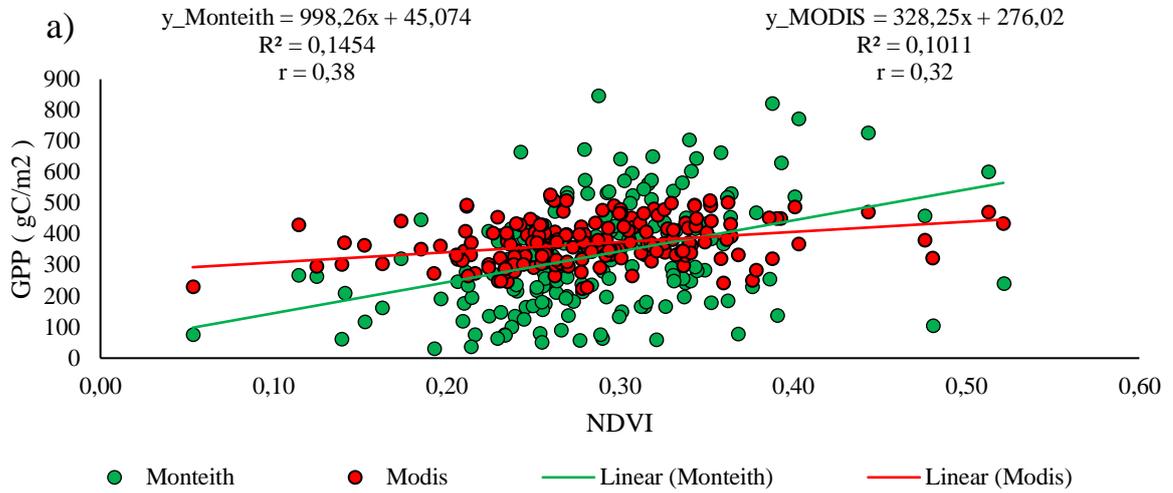
que auxilia na diminuição da vegetação e da GPP. Conrado (2020), destacou em um estudo sobre os efeitos da urbanização e do clima na produtividade primária de florestas urbanas no Sul e Sudeste do Brasil, que o processo de urbanização afetou de forma direta e indireta na Produtividade Primária de florestas urbanas ao longo do tempo, mostrando o impacto negativo da urbanização na Produtividade Primária Bruta.

Na figura 15 observa-se a correlação ( $r$ ) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre os métodos de obtenção de GPP e o NDVI, avaliados para o período de 2008 a 2022 em diferentes localidades do estado da Paraíba. No município de Areia (figura 15a), o método Monteith apresentou uma correlação moderada ( $r = 0,38$ ) e um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,14$ , sugerindo que aproximadamente 14,54% da variação da GPP pode ser explicada pelo NDVI. O método MODIS, por sua vez, apresentou valores semelhantes, com  $r = 0,32$  e  $R^2 = 0,101$ . Indicando relação positiva entre NDVI e GPP, mas com uma baixa capacidade preditiva, sugerindo a influência de outros fatores na produtividade primária.

Em Campina Grande (figura 15b), observou-se uma correlação forte entre o NDVI e a GPP pelo método Monteith ( $r = 0,75$ ) e um  $R^2 = 0,56$ , indicando que 56% da variação da GPP pode ser explicada pelo NDVI. O método MODIS também apresentou uma relação significativa, com  $r = 0,59$  e  $R^2 = 0,35$ , revelando que o NDVI desempenha um papel importante na explicação da variação da GPP nesta localidade, embora fatores adicionais também influenciem esse processo. Na cidade de João Pessoa (figura 15c), a correlação entre NDVI e GPP foi fraca para ambos os métodos. O método Monteith apresentou  $r = 0,32$  e  $R^2 = 0,10$ , enquanto o método MODIS apresentou  $r = 0,02$  e  $R^2 = 0,0003$  indicando que o NDVI tem um impacto muito limitado na variabilidade da GPP.

Em Monteiro (figura 15d), o método Monteith obteve  $r = 0,35$  e  $R^2 = 0,13$ , enquanto o método MODIS apresentou  $r = 0,52$  e  $R^2 = 0,27$ . Esses valores indicam uma relação positiva moderada, mas ainda insuficiente para explicar completamente a variabilidade da GPP. Por fim, no município de Patos (figura 15e), observou-se uma correlação relativamente fraca para ambos os métodos. O método Monteith apresentou  $r = 0,21$  e  $R^2 = 0,04$ , enquanto o método MODIS obteve  $r = 0,37$  e  $R^2 = 0,14$ . Esses resultados indicam que o NDVI tem uma influência limitada na GPP nesta localidade, sugerindo que a produtividade primária depende de outros fatores que não são captados diretamente pelo índice de vegetação. Santiago et al. (2022), investigando a influência de fatores ambientais na região do MATOPIBA, destacou que alterações nos fatores ambientais como Temperatura, precipitação e Evapotranspiração afetam os processos do ciclo

de Carbono e da água dos ecossistemas terrestres e, portanto, se refletem no comportamento do GPP. Essa relação foi encontrada por outros autores como Pereira e Castro, (2018) e Wang et al., (2020).



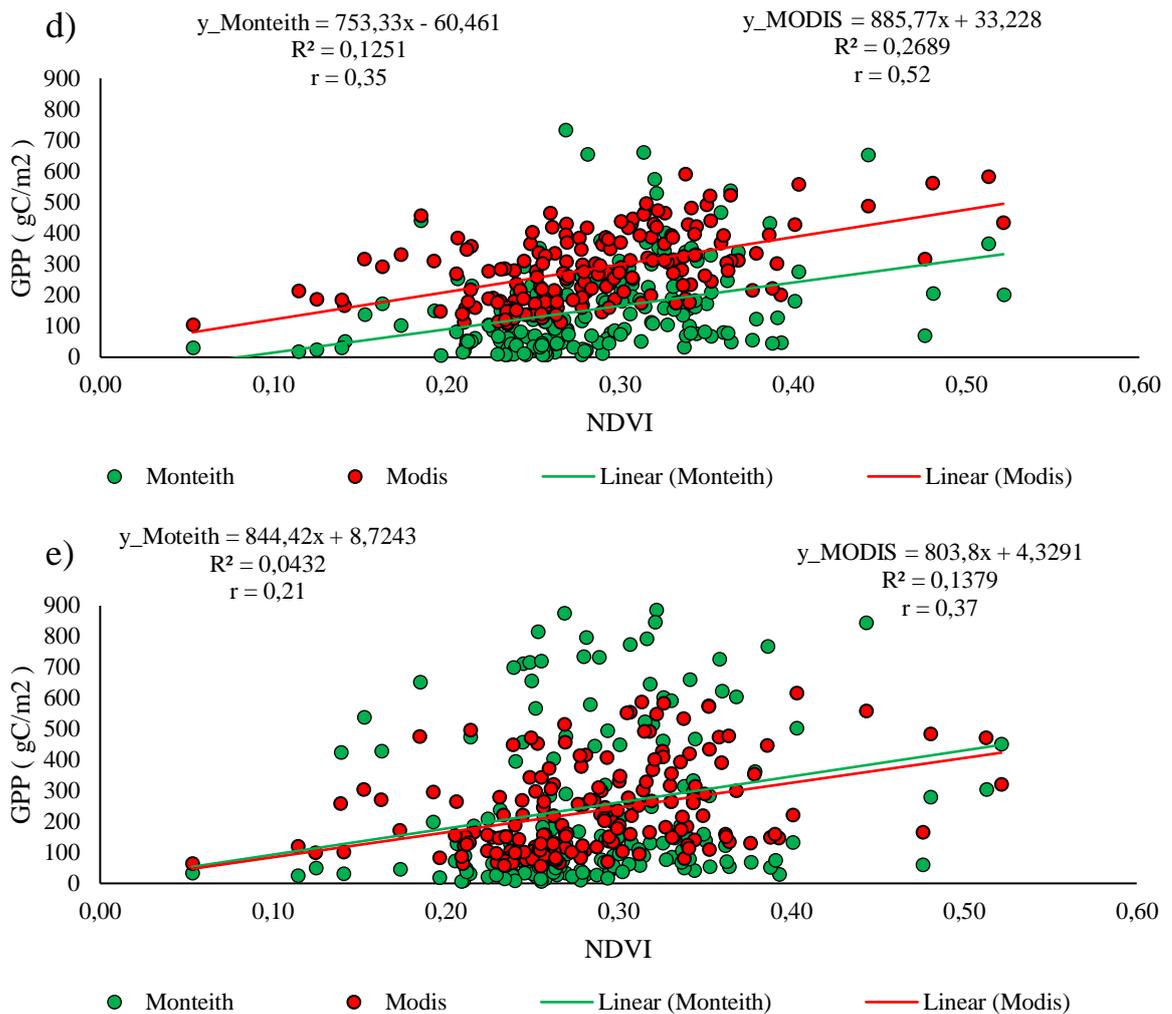


Figura 15: Comparação entre os Métodos de Obtenção da GPP e o NDVI, para cinco localidades: a) Areia-PB, b) Campina Grande-PB, c) João Pessoa-PB, d) Monteiro-PB e e) Patos-PB no período de 2008-2022 no estado da Paraíba. Fonte: Autora, 2025.

## CONCLUSÃO

O estudo confirmou a importância do sensoriamento remoto como uma ferramenta fundamental para monitorar a produtividade primária bruta (GPP) e a dinâmica da vegetação em diferentes regiões da Paraíba. Utilizando dados do MODIS e o método de Monteith, foi possível capturar com precisão a variação espacial e temporal do GPP a nível regional, assim como, para algumas localidades do Estado, evidenciando que o sensoriamento remoto oferece estimativas integradas espacialmente e mais adequadas para grandes áreas, enquanto o método de Monteith mostrou-se mais sensível às variações locais.

A comparação entre o método de Monteith e os dados do satélite MODIS revelou que ambos fornecem estimativas confiáveis de GPP, mas com sensibilidades distintas. O método de Monteith foi mais eficaz em captar as variações locais, enquanto o MODIS ofereceu uma visão mais integrada espacialmente, o que é vantajoso para estudos de larga escala. Cidades como Monteiro e Patos tiveram correlações mais altas entre os dois métodos (0,71 e 0,81, respectivamente), indicando que ambos capturam bem as variações de GPP nessas áreas. No entanto, em cidades como João Pessoa, Campina Grande e Areia, as correlações foram menos expressivas, sugerindo que fatores locais, como urbanização, já que as localidades estão próximas as regiões metropolitanas, podendo influenciar as estimativas da GPP.

Os resultados mostraram padrões consistentes na interação entre o NDVI, GPP e precipitação. Nas regiões semiáridas, como o Sertão e Cariri/Curimataú, apresentaram alta dependência da curta estação chuvosa, com picos de produtividade concentrados nos meses de maior pluviosidade, indicando que o NDVI é um bom indicador de chuva. Em contraste, o Brejo e o litoral demonstraram maior resiliência ecológica, caracterizada por altos índices de NDVI e GPP ao longo de quase todo o ano, favorecidos por um regime de chuvas mais regular e vegetação mais densa e de grande porte.

Por fim, o estudo forneceu informações sobre a relevância do sensoriamento remoto, como ferramenta estratégica no monitoramento ambiental e no planejamento de ações voltadas à sustentabilidade, especialmente em regiões que sofrem os efeitos das variações por condições climáticas extremas, como a Paraíba, destacando a necessidade de políticas públicas voltadas à mitigação e adaptação, reforçando a importância de integrar diferentes métodos para entender melhor a dinâmica da vegetação em resposta às mudanças climáticas e às condições ambientais.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Este trabalho promove informações que incentivam novas investigações, como:

- ✓ Ampliar a análise para regiões vizinhas, promovendo comparações inter-regionais no Nordeste brasileiro.
- ✓ Incorporar variáveis adicionais, como temperatura do solo e mudanças no uso da terra, para uma visão ainda mais detalhada das dinâmicas ecológicas.
- ✓ Examinar a variação espaço-temporal do GPP de forma anual, prevendo a mesma sob diferentes cenários futuros usando dados do CMIP6.

## 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.
- ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) - Advanced Training and User's Manual**. Idaho: University of Idaho, v.1, p. 97, 2002.
- ALMEIDA, A. J. M. (2024). Estudo do carbono inorgânico e orgânico na água, com ênfase na alcalinidade total, em dois estuários brasileiros (MA e SP) sob diferentes regimes de maré.
- 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
- BASTIAANSEN, 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.

- BASTIAANSEN, 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.
- BELLOLI, T. F. **Estimativa de biomassa e estoque de carbono de vegetação macrofítica a partir de dados espectrais e de campo, Banhado Grande, RS**. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BR-RS, 2019.
- 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, C. C.; BRITO, J. I. B.; SANSIGOLO, C. **Sazonalidade de índice de vegetação sobre o nordeste do Brasil**. Disponível em: [http://mtcm16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1915/2005/09.12.13.37/doc/Braga\\_Sazonalidade%20de%20indice.pdf.pdf](http://mtcm16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1915/2005/09.12.13.37/doc/Braga_Sazonalidade%20de%20indice.pdf.pdf)>. Acessado em 06/01/2024.
- BRAGA, C. C.; SILVA, B. B. Determinação de regiões pluviometricamente homogêneas no Estado da Paraíba. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 6, Salvador. **Anais[...]** Salvador, p.200-205. 1990.
- BRAGA, C. C. **Inter-Relações entre Padrões de Índice de Vegetação e de pluviometria no Nordeste do Brasil**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 2000. 124p.
- BRAGA, A. P. (2013). Estimativa da Produtividade Primária Bruta em Áreas Agrícolas e de Vegetação Primária no Cerrado por Sensoriamento Remoto.
- BRANQUINHO, F.; FELZENZWALB, I. **Meio Ambiente: Experiências em pesquisa multidisciplinar e formação de pesquisadores**. Rio de Janeiro: Mauad, 2007. 211 p.
- FAPERJBRUTSAERT, W.; SUGITA, M. Applications of self preservation in the

diurnal evolution of the surface energy budget to determine daily evaporation. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D17, p. 377 - 382, 1992.

BRITO MORAIS, Y. C., BEZERRA DE ARAÚJO, M. D. S., DE MOURA, M. S. B., GALVÍNCIO, J. D., & DE QUEIROGA MIRANDA, R. (2017). Análise do Sequestro de Carbono em áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(4), 585-599.

BRITO, J. I. B. DE; BRAGA, C. C. (2005). Chuvas no estado da Paraíba em 2004. Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia. V. 29, n, 1.

CARMO, F. H. D. J. D. (2022). Crescimento radial e propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis* Linn f. frente as variações climáticas e ocorrência de evento El Niño na Amazônia.

CARVALHO, J. M., & SOUZA, R. A. (2022). A influência da altitude e da localização geográfica no clima do Brejo Paraibano. *Revista de Geografia e Meio Ambiente*, 20(4), 134-150. Acesso em: 29 set. 2024

CHEN, Z.; WANG, W. & FU, J. Vegetation response to precipitation anomalies under different climatic and biogeographical conditions in China. *Nature*.2020, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57910-1>.

CONRADO, G. T. (2020). Efeitos da urbanização e do clima na produtividade primária de florestas urbanas no Sul e Sudeste do Brasil.

COSTA, G. K. N. (2024). A precipitação pluvial nos meses de junho e julho nos sertões da Paraíba e seus impactos ambientais.

Costa, L. H. (2023). Emissões de gases de efeito estufa em sistema integrado de produção na Caatinga.

CRESPO, A. M; SOUSA, M. N; SILVA, M. A. B. **Ciclo do carbono (C) e sistemas agroflorestais na sustentabilidade da produção agrícola: revisão de literatura.** Incaper em Revista, Vitória, v. 13 e 14, p. 6-19, dez. 2023. Disponível em: <<https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/4502/1/Ciclo-do-carbono-e-sistemas-agroflorestais.pdf>> Acesso em 28 fev. 2024.

- CUSTODIO, L. L. M. (2021). Estimativa da produtividade primária bruta no nordeste do Brasil com produtos MODIS e influência da base de dados meteorológicos.
- DA SILVA, J. N. B., GALVÍNCIO, J. D., DA SILVA, J. L. B., SOARES, G. A. S., TIBURCIO, I. M., & BARROS, J. P. F. G. (2024a). Estimativas de sequestro de carbono por diferentes métodos em ecossistemas florestais: uma abordagem sobre a floresta tropical sazonalmente seca (Caatinga). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, 12(1).
- DA SILVA, J. N. B., GALVÍNCIO, J. D., DE QUEIROGA MIRANDA, R., & DE MOURA, M. S. B. (2024b). ESTIMATIVA TEMPORAL E ESPACIAL DO DESEMPENHO DOS MODELOS DE REGRESSÃO CALIBRADOS PARA OS FLUXOS DE CARBONO EM ÁREA DE FLORESTA TROPICAL SAZONALMENTE SECA DE CAATINGA. **Revista da Casa da Geografia de Sobral (RCGS)**, 26(1), 183-206.
- Da Silva, J. N. B., Galvínio, J. D., de Queiroga Miranda, R., & Besera, M. S. (2021). Modelos da Produtividade Primária Bruta em área de floresta tropical em sazonalmente seca, usando dados reflectância da vegetação de caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 14(06), 3775-3784.
- DAUGHTRY, C. S. T.; McMURTREY III, J. E.; CHAPPELLE, E. W.; DULANEY, W. P.; IRONS, J. R.; SATTERWHITE, M. B. Potential for discriminating crop residues from soil by reflectance and fluorescence. **Agronomy Journal**, v.87, n.2, p.165-171, 1995.
- 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 MEDEIROS, R. L. B., de Meneses Sousa, G., de Figueiredo, C. F. V., de Sousa Formiga, A. C., de Oliveira, F. F. D., de Oliveira, P. A. T., ... & Leite, A. C. N. (2022). Resposta espectral do comportamento do NDVI e NDWI diante de diferentes intensidades pluviométricas na cidade de Patos–PB. **Research, Society and Development**, 11(3), e49811326819-e49811326819.
- DE OLIVEIRA, A. C. C. F., BEZERRA, B. G., & EMILIAVACA, S. D. A. S. (2022, August). **OBTENÇÃO DA EFICIÊNCIA DE USO DA LUZ DO BIOMA CAATINGA**

**SOBRE O RIO GRANDE DO NORTE.** In Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS (pp. 1-6).

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.

DE SOUSA VIEIRA, L. C., DE PAULA SILVA FILHO, V., DE ALMEIDA DANTAS, V., SATYAMURTY, P., & DE SÁ, A. S. (2022). Sazonalidade do sequestro e estoque de carbono na Caatinga, durante as estações seca e chuvosa. *Revista Brasileira de Climatologia*, 31, 539-564.

DIDAN, K.. **MOD13A1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m SIN Grid V006** . 2015, distribuído pelo NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A1.006>. Acesso em 18 jul. 2024.

DOS ANJOS XAVIER, J., MUNIZ, B. R. B., KANIESKI, M. R., CAMPOS, C. G. C., & HENKES, J. A. (2022). Impactos das mudanças climáticas nas florestas tropicais. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 11(2), 65-82.

DOS SANTOS, C. V. B., de Mello Baptista, G. M., de Moura, M. S. B., de Barros Silva, A., de Sousa Carvalho, H. F., & Galvíncio, J. D. (2023). Validação de um modelo espectral para determinação de fluxos de CO<sub>2</sub> em áreas do Bioma Caatinga. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, 8(3), 226-239.

DUNCANSON, L., LIANG, M., LEITOLD, V., ARMSTON, J., KRISHNA MOORTHY, S. M., DUBAYAH, R., ... & ZVOLEFF, A. (2023). The effectiveness of global protected areas for climate change mitigation. *Nature Communications*, 14(1), 2908.

EOS Data Analytics: Soluções espaciais para problemas da Terra. Disponível em: <https://eos.com/pt/make-an-analysis/ndvi/> . Acesso em: 10 Jan. 2024.

FERREIRA, G. R., & ALMEIDA, J. S. (2023). Análise da 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. **Classificação e mapeamento das terras para mecanização do Estado da Paraíba utilizando sistemas de informações geográficas**. 122f. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água). Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2010.
- FRANCISCO, P. R. M., CHAVES, I. D. B., & CHAVES, L. H. G. (2020). Bioma caatinga e degradação: modelo de mapeamento.
- FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D. **Aptidão climática do estado da Paraíba para as principais culturas agrícolas**. Areia: UFPB, 120 p. 2018.
- FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D. **Climatologia do estado da Paraíba**. Campina Grande: EDUFPG, 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.
- GAN, M. A.; KOUSKY, V. E. **Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano Atlântico Sul**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 1, p. 19-28, 1986.
- 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
- GONÇALVES RODRIGUES, L. E. O. N. C. I. O., MAIA MEIRELES, A. C., & WAGNER OLIVEIRA, C. A. R. L. O. S. (2021). EMPREGO DO SENSORIAMENTO REMOTO PARA ANÁLISE DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO PERÍMETRO IRRIGADO VÁRZEAS DE SOUSA-PB. *Revista IRRIGA-Brazilian Journal of Irrigation & Drainage*.

- 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
- GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D. & MOORE, R. 2017. Google Earth Engine: Análise geoespacial em escala planetária para todos. Sensoriamento remoto do ambiente. Acesso em: 02 de jul. 2024.
- HILKER, T.; COOPS, N. C.; WULDER, M. A.; BLACK, T. A.; GUY, R. D. The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: A review of current status and future requirements. **Science of the Total Environment**, v.404, p.411- 423, 2008.
- IBGE. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/panorama>>. Acesso em: 05 jan. 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.
- INFOESCOLA. Disponível em: <https://www.infoescola.com/geografia/vegetacao-da-paraiba/>. Acessado em 05 jan. 2024.
- JENSEN, J. R. (2015). Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective. 2ª ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson. Acessado em 15 jan. 2024.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. Digital image processing. In: **Remote sensing and image interpretation**. New York: John Wiley. 6th ed, 2007.p 491-503.
- 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 e 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
- MARTINS, Isabelle Lima; DE SOUZA ALCÂNTARA, Ricardo Wagner. A interconexão entre mudanças climáticas e direitos fundamentais: Uma abordagem interdisciplinar para mitigação e adaptação aos eventos extremos. **Research, Society and Development**, v. 13, n. 7, p. e0913746159-e0913746159, 2024.
- MARTINS, P. D., SPINELLI, J., & ARAUJO, L. M. DE. (2024). Produção Imobiliária em Patos e Campina Grande-PB (2009-2020): Expansão Urbana, Atuação dos Agentes Urbanos e Desigualdades Socioespaciais. *Espaço Aberto*, 14, 327–346. <https://doi.org/10.36403/espacoaberto.2024.61165>
- MAPBIOMAS. *Mapa de uso e cobertura da terra*. 2023. Disponível em: <https://mapbiomas.org>. Acesso em: 5 abr. 2024.
- 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, E. D. A. (2024). Variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial e eventos extremos no estado da Paraíba.
- 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
- 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.

- 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).
- 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
- NUNES, L. J., MEIRELES, C. I., PINTO GOMES, C. J., & ALMEIDA RIBEIRO, N. M. (2020). Forest contribution to climate change mitigation: Management oriented to carbon capture and storage. *Climate*, 8(2), 21.
- 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.
- PENA, R. F. A. **Sensoriamento Remoto**. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/sensoriamento-remoto.htm>. Acesso em: 09 fev. 2024.
- 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
- PEREIRA, CN, PORCIONATO, GL, & CASTRO, N. (2018). Aspectos socioeconômicos da região do MATOPIBA. *Boletim regional, urbano e ambiental do IPEA* , 18 , 47-60.
- QIN, Y., XIAO, X., WIGNERON, J. P., CIAIS, P., BRANDT, M., FAN, L., ... & MOORE III, B. (2021). Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Climate Change*, 11(5), 442-448.
- RAMOS, M. F. **Estudo da variação temporal do índice de vegetação por diferença normalizada em juiz de fora a partir de imagens de satélite**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Juiz de fora, Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Juiz de Fora, 2016.

- RICKLEFS, R. E. **A economia da natureza**. Guanabara Koogan. ed. 6, p. 45-437, ISBN 978-85-277-1677-2. Rio de Janeiro, 2012.
- RIBEIRO, K., DE SOUSA-NETO, E. R., DE CARVALHO JUNIOR, J. A., DE SOUSA LIMA, J. R., MENEZES, R. S. C., DUARTE-NETO, P. J., ... & OMETTO, J. P. H. B. (2016). Land cover changes and greenhouse gas emissions in two different soil covers in the Brazilian Caatinga. *Science of the Total Environment*, 571, 1048-1057.
- ROCHA, D. S. (2022). Análise dos impactos ambientais na vegetação de caatinga causados pela urbanização no município de Pombal-PB.
- RODRIGUES, C.C. F. **Produtividade Primária Bruta para áreas de cana-de-açúcar e cerrado na Bacia Hidrográfica do Mogi-Guaçu – SP**. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Campina Grande. 73p., 2018.
- ROSENDO, J. S. **Índices de Vegetação e Monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na Bacia do rio Araguari -MG - utilizando dados do sensor Modis**. 2005. 130 p. Dissertação (Mestrado em Geografia e Gestão do Território) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2005. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/read/12466122/indices-de-vegetacao-e-monitoramento-do-uso-do-solo-e-cobertura-2> . Acesso em: 08 jan. 2024.
- ROUSSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D.W. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. In: Earth Resources Technology Satellite1 Symposium, 3, 1973. Proceedings. Washington, 1973, v.1, Sec.A, p. 309-317.
- RUNNING, S. W., & ZHAO, M. (2015). Daily GPP and annual NPP (MOD17A2/A3) products **NASA Earth Observing System MODIS land algorithm**. MOD17 User's Guide, 2015, 1-28.
- RUNNING, S.; MU, Q.; ZHAO, M. **MOD17A2H MODIS/Terra Gross Primary Productivity 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006**. 2015, distributed by NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A2H.006>. Acesso em: 18 jul. 2024.
- SABATER, J. M **Dados médios mensais do ERA5-Land de 1981 até o presente**. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019. doi:10.24381/cds.68d2bb30. Acesso em: 10 jul. 2024.

- SANTIAGO, D. D. B., BARBOSA, H. A., CORREIA FILHO, W. L. F., & OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. D. (2022). Interactions of environmental variables and water use efficiency in the MATOPIBA region via multivariate analysis. *Sustainability*, 14(14), 8758.
- 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 e\\_prim% c3% 81ria\\_fitoplanct% c3% 94nica\\_na\\_represa\\_samambaia\\_em\\_goi% c3% 82nia\\_-\\_go.pdf](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 Brasílica*, 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 DA, S. T. A **Influência do El Niño-Oscilação Sul na distribuição espacial da precipitação no estado da Paraíba**. 63p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 1996.
- SILVA, B. B. da, MENDONÇA, R. R. O.; SILVA, S. T. A. da; FERREIRA, R.C. Mapeamento do albedo de áreas heterogêneas do Estado da Ceará com imagens TM - Landsat 5. *Revista de Geografia*, v.25, p.33-52, 2008.
- SILVA, B. B.; GALVÍNICO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MACHADO, C. C. C.; OLIVEIRA, L. M. M.; MOURA, M. S. B. Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo – PB. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.28, n. 1, 307-314, 2013.

- 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, J. M. D. (2018). Reestruturação produtiva da pecuária e novas dinâmicas territoriais no município de Monteiro (PB).
- 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.
- SIGNOR, D., MEDEIROS, T. A. F., MORAES, S. A. D., CORRÊA, L. C., TOMAZI, M., MOURA, M. S. B. D., & DEON, M. (2022). Soil greenhouse gases emissions in a goat production system in the Brazilian semiarid region. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 52, e72371.
- SILVA, B. B. da; GALVÍNCIO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MACHADO, C. C. C.; OLIVEIRA, L. M.M.; MOURA, M.S.B.; Determinação por Sensoriamento Remoto da Produtividade Primária Bruta do Perímetro Irrigado São Gonçalo – PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.1, 57 - 64, 2013.
- SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5 -TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.13, p.201 - 211, 2005.
- 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, Bernardo B. da. **Balancos 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, D. P., & da Silva, J. B. (2023). **CARACTERIZAÇÃO FISIONÔMICA DAS RESTINGAS DO ESTADO DA PARAIBA: SENSORIAMENTO REMOTO COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE DO ESPAÇO**. In Anais do Congresso de Iniciação Científica, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da Universidade Federal de Campina Grande (Vol. 20, No. 2).

- 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, 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 reflectância 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, 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, 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, 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).
- SOUZA, L. D. S., MEDEIROS, E. S. D., GALBETTI, M. V., BICALHO, C. C., SANTOS, C. A. C. D., SHINMA, T. A., ... & OLIVEIRA, L. A. D. (2022). Modelagem Espacial de Chuvas Intensas no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37, 373-383.
- SOUZA, B. S.; CANTALICE W. L. B.C.; BRAGA C.; SILVA, M. T.; SILVA, E. A. Response of the EVI Vegetation Index to precipitation anomalies in the State of Paraíba. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**. v.12, n.1 p.10-19, 2022.
- SOUZA, J. D. de; SILVA, B. B. da. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM: Landsat 5. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.23, p.349–358, 2005.
- SOUZA, M. F. L.; LONGHINI, C. M.; SILVA, A. M.; LENTINI, C. A. D. Ciclo do Carbono: Processos Biogeoquímicos, Físicos e Interações entre Compartimentos na Baía de Todos os Santos. **Revista Virtual de Química**, v.4, n.5, p.566-582, 2012. Disponível em: <http://www.uff.br/rvq>. Acesso em: 08 jan. 2024.
- TALLES, J. D. A.; SOUZA, K. S; FARIAS, R. G. Análise Temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) na Bacia Hidrográfica do Rio Branco–BA. Universidade do Estado da Bahia. São Paulo, UNESP. **Revista Geociências**, v. 41, n. 2, p. 497-502, 2022.
- VERMOTE, E.; WOLFE, R. **MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m SIN Grid V061** . 2021, distribuído pelo NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD09GA.061>. Acesso em: 18 jul. 2024.

- WAN, Z.; HOOK, S.; HULLEY, G. **MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061**. 2021, distribuído pelo NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A1.061>. Acesso em: 18 jul. 2024.
- WANG, Liuming et al. An analytical reductionist framework to separate the effects of climate change and human activities on variation in water use efficiency. **Science of The Total Environment**, v. 727, p. 138306, 2020.
- WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2. ed. London, Academic Press, 2006. 649p.
- WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K.; KLINK, D. R., 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. 5, 1985, p. 8995-9005
- XIAO, X. M.; ZHANG, Q. Y.; BRASWELL, B.; URBANSKI, S.; BOLES, S.; WOFSY, S.; MOORE, B.; OJIMA, D. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. **Remote Sensing of Environment**, v.91, n.2, p.256-270, 2004.
- XIE, S.; MO, X.; LIU, S. Contributions of climate change, elevated atmospheric CO<sub>2</sub> 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>.