



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Monitoramento de Variáveis Ambientais em Parcelas de Estudos Ecológicos de Longa Duração no Semiárido Utilizando Sensoriamento Remoto

Sabrina Holanda Oliveira¹, Edilândia Farias Dantas², Ana Dolores Santiago de Freitas³, Bruce Kelly da Nóbrega Silva⁴, Everardo Valadares de Sá Barretto Sampaio⁵, Josimar Gurgel Fernandes⁶, John Elton de Brito Leite Cunha⁷, Aldrin Martin Perez-Marin⁸, Romulo Simões Cezar de Menezes⁹

¹Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande/PB, sabrina.holanda.oliveira@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-0332-6447>); ²Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife/PE, edilandiadantas@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-9251-7784>); ³Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife/PE, anadoloressantiagodefrees@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-5808-097X>) (autora correspondente); ⁴Núcleo de Desertificação e Agroecologia, Instituto Nacional do Semiárido (INSA), Campina Grande/PB, bruce.silva@insa.gov.br (<https://orcid.org/0000-0002-1270-1336>); ⁵Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife/PE, sampaio.everardo@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-4745-016X>); ⁶Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA), Recife/PE, josimar.gurgel@ipa.br, (<https://orcid.org/0000-0002-0704-0668>); ⁷Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Sumé/PB, john.brito@ufcg.edu.br (<https://orcid.org/0000-0002-1783-2343>); ⁸Núcleo de Desertificação e Agroecologia, Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande, PB, Brasil, aldrin@insa.gov.br (<https://orcid.org/0000-0001-9855-3284>); ⁹Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife/PE, romuloscmenezes@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-8740-366X>).

Artigo recebido em 01/06/2024 e aceito em 18/02/2025

RESUMO

A Caatinga, que ocupa aproximadamente metade de sua área original devido à pressão antrópica, carece de estudos ecológicos de longa duração. Para suprir essa lacuna, foi criada a Rede de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração no Nordeste Semiárido (PERENE), com oito unidades experimentais distribuídas pela Caatinga. Este estudo teve como objetivo utilizar sensoriamento remoto no monitoramento de variáveis ambientais, fornecendo uma base para os estudos ecológicos realizados pela PERENE. Utilizou-se o Google Earth Engine (GEE) para monitorar, entre 2012 e 2022, precipitação, evapotranspiração, temperatura, cobertura vegetal e produtividade primária. Dados de precipitação foram obtidos do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data* (CHIRPS), enquanto o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), temperatura de superfície e produtividade primária líquida (NPP) e bruta (GPP) foram derivados do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). A evapotranspiração real foi estimada pelo algoritmo *Seasonal Tropical Ecosystem Energy Partitioning* (STEEP). Os resultados apontaram significativa variabilidade pluviométrica, com extremos anuais registrados em Petrolina/PE (393 mm) e Nossa Senhora da Glória/SE (801 mm). Essa variação influenciou diretamente a produtividade vegetal e o ciclo de carbono. Nos anos mais chuvosos, observou-se aumentos no NDVI, GPP e NPP. Porém, mesmo durante secas severas, a Caatinga atuou como sumidouro de carbono, com médias anuais de 899 g C m⁻² (NPP) e 1528 g C m⁻² (GPP). Os resultados evidenciam a complexidade da Caatinga, reforçando a importância das chuvas na dinâmica da vegetação bem como a necessidade de estudos de longo prazo.

Palavras-chave: Parâmetros meteorológicos; cobertura da terra; demanda hídrica da vegetação.

Monitoring Environmental Variables in Long-Term Ecological Study Plots in the Semi-Arid Region Using Remote Sensing

ABSTRACT

The Caatinga, which occupies approximately half of its original area due to anthropogenic pressure, lacks long-term ecological studies. To fill this gap, the Long-Term Ecological Research Network in the Semi-arid Northeast (PERENE) was created, with eight experimental units distributed across the semi-arid region. This study aimed to use remote sensing to monitor environmental variables, providing a basis for ecological studies conducted by PERENE. The Google Earth Engine (GEE) was used to monitor precipitation, evapotranspiration, temperature, vegetation cover, and primary productivity between 2012 and 2022. Precipitation data were obtained from the *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data* (CHIRPS), while the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), surface temperature, and net primary productivity (NPP) and gross primary productivity (GPP) were derived from the *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Real evapotranspiration was estimated using the *Seasonal Tropical Ecosystem Energy Partitioning* (STEEP) algorithm. The results showed significant rainfall variability, with annual

extremes recorded in Petrolina/PE (393 mm) and Nossa Senhora da Glória/SE (801 mm). This variation directly influenced vegetation productivity and the carbon cycle. In wetter years, increases in NDVI, GPP, and NPP were observed. However, even during severe droughts, the Caatinga acted as a carbon sink, with annual averages of 899 g C m⁻² (NPP) and 1528 g C m⁻² (GPP). The results highlight the complexity of the Caatinga, reinforcing the importance of rainfall in the dynamics of vegetation as well as the need for long-term studies.

Keywords: Meteorological parameters; vegetation cover; vegetation water demand.

Introdução

As florestas tropicais secas (FTS) cobrem uma área de 0,5 a 1,1 bilhões de hectares da superfície do globo, o que representa cerca de metade da área coberta por florestas tropicais úmidas (Schröder, Ávila Rodríguez e Günter, 2021). No Brasil, as FTS estão distribuídas no bioma Caatinga, uma região semiárida, que apresenta um complexo padrão hidrológico, com chuvas irregulares, longos períodos de estiagem e uma diversidade de sete diferentes tipos de solo (Lima et al., 2023; Menezes et al., 2021; Oliveira et al., 2021a). A combinação de clima, solo e antropização tem criado um multifacetado mosaico de cenários paisagísticos (Santos et al., 2020a). Estes cenários têm sido pouco estudados, havendo pouquíssimos sítios de pesquisa ecológica de longa duração na Caatinga (Guimaraes et al., 2024). Todavia, há necessidade de iniciativas que possam contribuir para o melhor entendimento do funcionamento dos ecossistemas da região, em particular aqueles sob forte influência antrópica (Silva et al., 2024a).

As atividades antrópicas, principalmente a pecuária e a agricultura, causaram severas alterações na vegetação, nos solos e na fauna originais, ao longo do processo de ocupação nos últimos séculos (Alves, Araújo e Nascimento, 2008; Araújo Filho, 2013). Aproximadamente metade da cobertura de floresta tropical seca nativa já foi substituída por pastagens e campos de cultivo agrícola (Gariglio et al., 2010) e a cobertura florestal remanescente é composta por fragmentos de vegetação secundária em diversos estágios de regeneração (Costa et al., 2021a; Menezes et al., 2021; Oresca et al., 2024; Schulz et al., 2019).

Secularmente, a vegetação da Caatinga tem sido a principal fonte de alimentação para os animais no semiárido brasileiro, sendo utilizada como pastagem nativa (Araújo Filho, 2013; Ferreira et al., 2024). As áreas pastoreadas apresentam formações vegetais com características distintas da Caatinga em seu estágio clímax, especialmente quando há sobrepastejo. Esse processo resulta em uma vegetação dominada, em sua maioria, por plantas em estádios iniciais ou intermediários de sucessão ecológica (Araújo Filho, 2013; Oliveira et al., 2021b; Schulz et al., 2019). O sobrepastejo também pode acarretar a degradação das pastagens, manchas de solo

desnudo e, em muitas áreas, severos problemas de erosão e de desertificação (Barbosa Neto et al., 2021; Oliveira et al., 2021b; Oresca et al., 2024).

Quando a atividade pecuária é cessada, a regeneração da Caatinga ocorre ao longo de vários anos, com o crescimento de arbustos e árvores (Oliveira et al., 2021b). Em áreas submetidas a uma menor pressão antrópica, a vegetação tende a ser mais densa e constituída por maior diversidade de espécies, um padrão também observado em outras regiões tropicais semiáridas (Oliveira et al., 2024).

Uma das mudanças mais drásticas na vegetação nativa é a substituição por pastagens cultivadas com espécies introduzidas, especialmente capins africanos. É um processo iniciado em 1942 e que já afeta cerca de 20% da área original de Caatinga (Ribeiro et al., 2016; Souza e Freitas, 2017). A vegetação de Caatinga tende a reocupar seu espaço, mas é frequente que as pastagens plantadas sejam manejadas com queimadas periódicas e com roço, retardando o processo natural de sucessão (Schulz et al., 2019). Como consequência das profundas alterações pelas quais vêm passando, a Caatinga tem grandes extensões em processo de desertificação, existindo uma relação estreita entre esta degradação, a vegetação, os solos e o uso dado pelo homem (Barbosa Neto et al., 2021; Costa et al., 2009). Essas alterações podem ser agravadas pelas mudanças climáticas globais em curso, que também devem impactar a região nordestina (Costa et al., 2022; Lima et al., 2023).

Para detectar, compreender e prever os possíveis efeitos destas mudanças, bem como avaliar o impacto e os benefícios da adoção de práticas mitigadoras, é necessário descrever as condições ambientais atuais de forma abrangente. Isso inclui representar a ampla gama de situações que ocorrem no semiárido, como os diferentes usos e cobertura da terra. Porém o número de trabalhos científicos sobre FTS ainda é reduzido, representando apenas um terço do total de pesquisas realizadas em florestas úmidas, mesmo cobrindo áreas de extensão semelhante (Costa et al., 2022; Schröder, Ávila Rodríguez e Günter, 2021). Dentro do contexto brasileiro, a Caatinga se destaca como o bioma menos estudado entre todos os biomas do país (Oliveira et al., 2021a).

Parte dos estudos ecológicos deveriam ser planejados para ter longa duração, a fim de monitorar mudanças que não podem ser detectados em análises de curta prazo duração (Tabarelli et al., 2013). Estes estudos devem continuar e complementar as pesquisas já iniciadas sobre clima, fluxos de água e de carbono (Costa et al., 2021b; Lima et al., 2023; Oliveira et al., 2022), produtividade primária (Oliveira et al., 2021a), estoques de carbono e nitrogênio (Menezes et al., 2021; Silva et al., 2024b) e características microbiológicas dos solos (Oliveira et al., 2021b; Silva et al., 2024a, 2024b), em diferentes coberturas e usos da terra. Devem também permitir a extrapolação para áreas mais amplas que as parcelas experimentais com o uso de sensoriamento remoto (Costa et al., 2021b; Nascimento et al., 2022; Silva et al., 2024b) e modelagem (Oliveira et al., 2022).

Neste sentido, no ano de 2017, foi criada a Rede de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração no Nordeste Semiárido (PERENE), que compreende unidades de pesquisa estabelecidas nos principais tipos de cobertura vegetal utilizadas para fins pecuários no Semiárido. A PERENE é uma das redes que compõem o INCT-Observatório Nacional da Dinâmica da Água e do Carbono no Bioma Caatinga (OndaCBC), e se propõe a avaliar, ao longo do tempo, os impactos das mudanças de cobertura e uso da terra, do pastejo e da variabilidade climática sobre o funcionamento dos ecossistemas e a biodiversidade no Bioma Caatinga.

O objetivo deste trabalho é descrever os resultados da utilização de ferramentas de Sensoriamento Remoto (SR) no monitoramento de variáveis ambientais, fornecendo uma base para os estudos ecológicos realizados na PERENE. Para isso, inicialmente será descrito o histórico e o protocolo de instalação das unidades experimentais com seu georreferenciamento, propiciando a existência de um marco geográfico inicial para as pesquisas de longa duração que serão realizadas.

Metodologia

Instalação e caracterização das áreas experimentais

Atualmente, a PERENE possui oito unidades experimentais localizadas na Caatinga, distribuídas por oito cidades da região semiárida (Figura 1). A implantação das parcelas iniciou-se em 2018, com a proposta de fazer o monitoramento em unidades experimentais especializadas em diferentes microrregiões do Semiárido. No mesmo ano, foram implantadas cinco unidades em estações experimentais do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA). Em 2019, foi implantada uma unidade em Petrolina, no campo experimental do IFSertão. Em 2020, foi implantada uma unidade no Campo Experimental Nossa Senhora da Glória da Embrapa Semiárido, no município Gracho Cardoso, comarca de Nossa Senhora da Glória, em Sergipe. Em 2022, foi instalada uma unidade no Instituto Nacional do Semiárido (INSA), em Campina Grande, Paraíba.

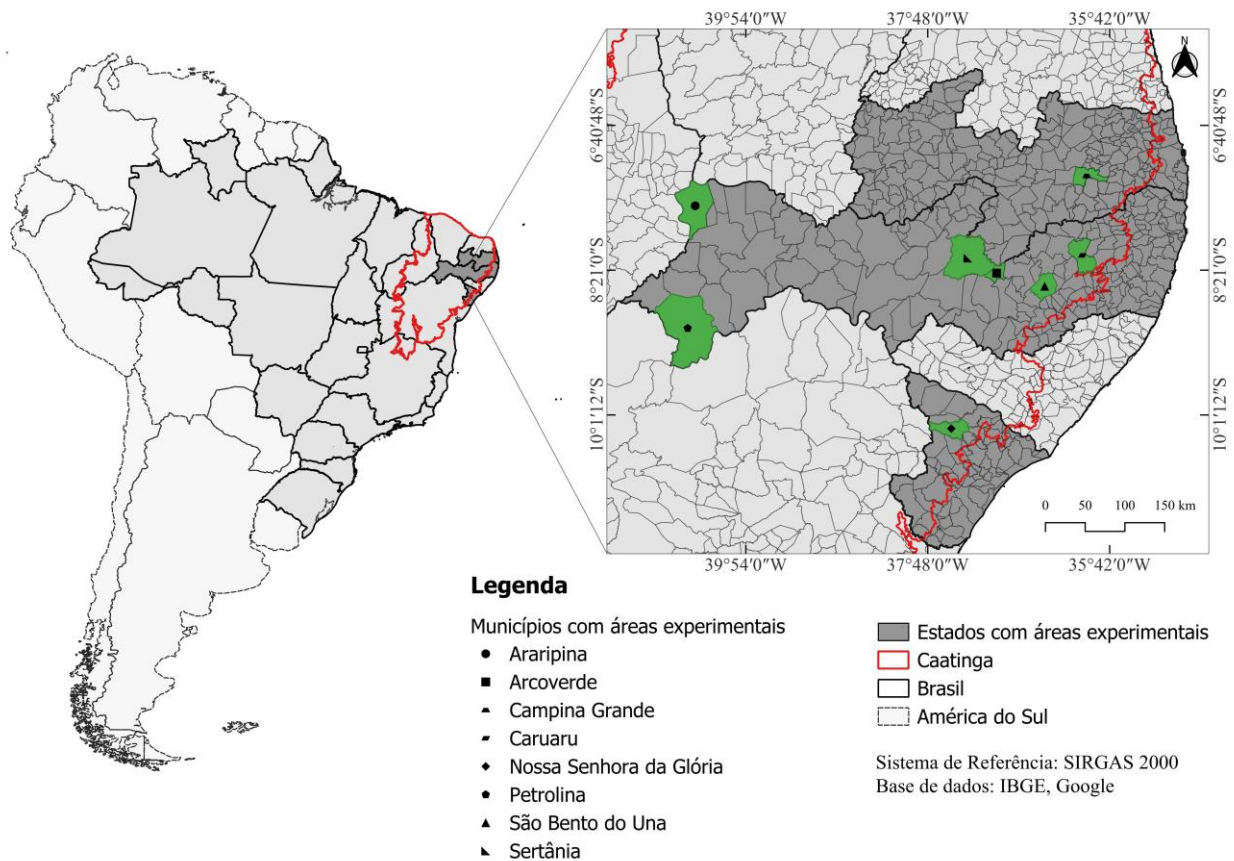


Figura 1. Distribuição espacial das unidades experimentais permanentes da Rede de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração no Nordeste Semiárido (PERENE) na Caatinga.

As unidades experimentais são desenhadas com o objetivo de terem baixa manutenção, praticidade no acompanhamento, ampla área (500 m x 500 m) uniforme, e até o isolamento da área, que estivessem sendo utilizada para pecuária. A Figura 2 apresenta exemplos das formações fisionômicas utilizada para implantação das unidades experimental. Cada unidade experimental inclui os seguintes tipos de cobertura vegetal do bioma Caatinga:

Caatinga fechada – Caatinga em avançado estado de crescimento e regeneração e, em vários casos, de sucessão ecológica, com dossel que intercepta mais de 80% da luz solar radiante e que pode ser reconhecido visualmente em imagens de satélite de alta resolução como área com alta densidade de árvores e poucos pontos de solo nu;

Caatinga aberta – Caatinga com menor densidade de árvores e arbustos grandes e maior cobertura de estrato herbáceo, em estágio inicial/intermediário de regeneração e sucessão ecológica. Esse tipo de formação pode ser derivado por limitação edafoclimática, ou seja, uma interação de solos pouco férteis e baixa precipitação pluvial, que limitam o crescimento das plantas, e por ação antrópica, que modificou o

equilíbrio biológico, mantendo o sistema em estádios iniciais de sucessão. É difícil distingui-la da caatinga fechada, mas ela tem menor biomassa vegetal;

Pastagem herbácea – área antropizada formada por herbáceas, com poucos arbustos grandes e árvores em regeneração, com diâmetros de caule menores que 6 cm. Essas áreas geralmente são impedidas do avanço na sucessão ecológica pela ação do homem (roço e queima) e pelo excesso de pastejo. As pastagens foram estabelecidas há mais de 30 anos, após o corte da vegetação nativa, podendo ter sido seguido por cultivo durante vários anos com culturas de ciclo curto (principalmente milho e feijão). As pastagens originalmente foram compostas por gramíneas nativas espontâneas e outras plantas herbáceas e, mais recentemente, algumas foram plantadas com gramíneas introduzidas (comumente capim-buffel, *Cenchrus ciliaris* L.). Em geral, são sobrepastejadas por bovinos ou caprinos, levando a uma condição degradada. A queima intencional ocorre a cada poucos anos. Em nenhuma delas foram aplicados fertilizantes ou calcário.

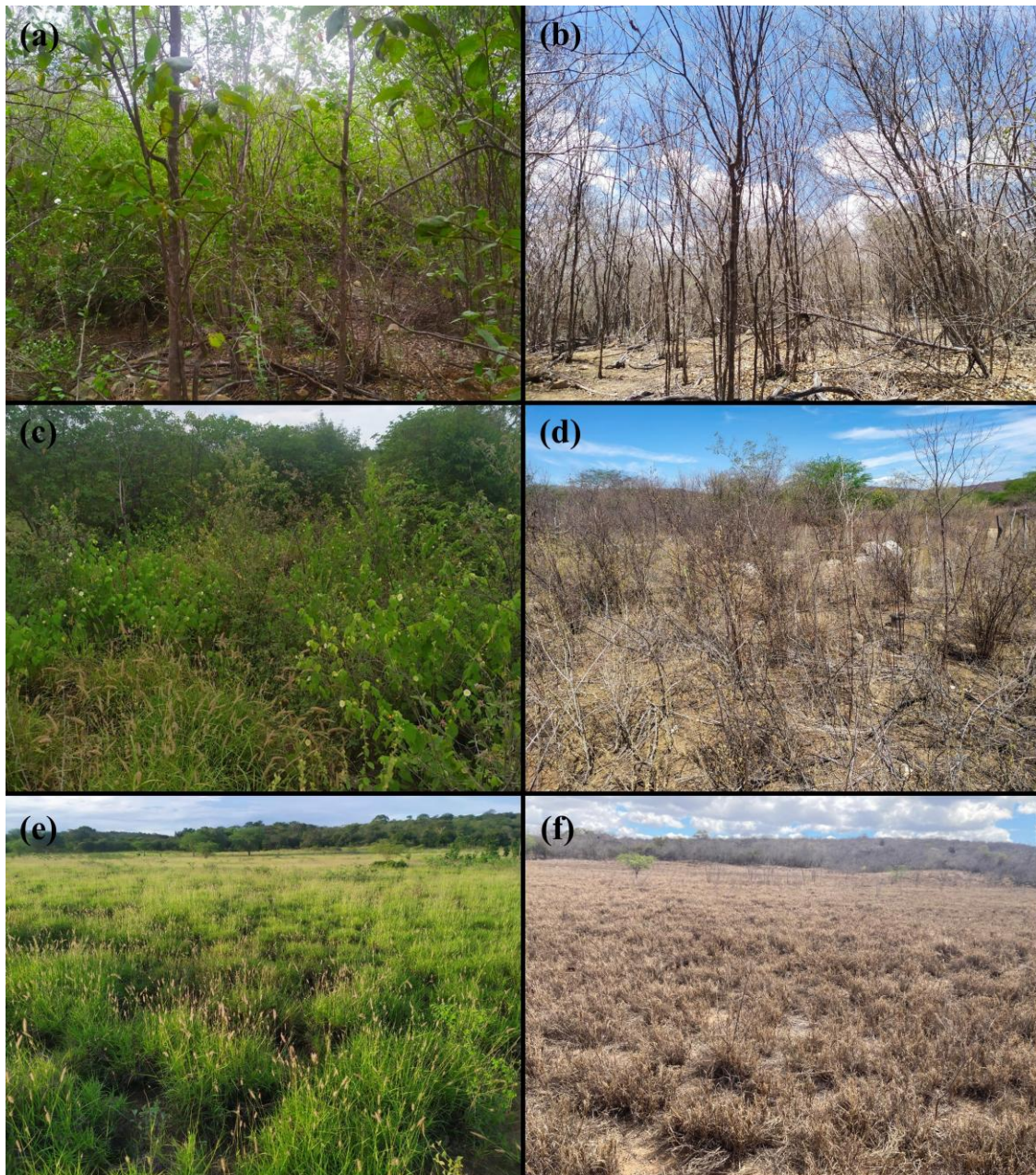


Figura 2. Exemplos das formações fisionômicas observadas durante a implantação das unidades experimentais para (a) e (b) caatinga fechada; (c) e (d) caatinga aberta; (e) e (f) pastagem herbácea durante os períodos chuvoso e seco.

Em cada unidade de pesquisa estão delimitadas duas parcelas de 25 × 25 m em cada tipo de cobertura (Caatinga fechada, Caatinga aberta e pastagem), incluindo bordaduras, ficando uma área útil de 20 × 20 m. A parcela foi desenhada com base em estudos prévios da Caatinga, que, de forma geral, identificaram que esse tamanho foi suficiente para captar as dinâmicas fitossociológicas e biogeoquímicas do ecossistema (Comitê Técnico Científico da Rede de Manejo Florestal da Caatinga, 2005).

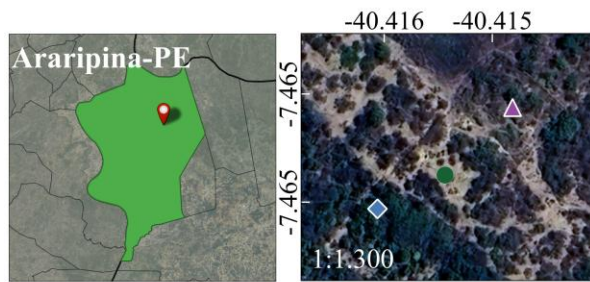
Em uma das parcelas é permitido o pastejo, sendo demarcada apenas com piquetes nos vértices. Na outra parcela, o pastejo não é permitido, e ela é cercada para impedir a entrada de

animais. Essas parcelas sem pastejo são denominadas de parcelas com exclusão de animais, enquanto as demais são chamadas de parcelas sem exclusão de animais. O isolamento dessas áreas, com a retirada do gado e a eliminação de roço e queimadas, foi uma ação tomada para promover a recuperação da vegetação e do solo (Oliveira et al., 2021a; Silva et al., 2024c). Com o prosseguimento das pesquisas e obtenção de financiamentos, a proposta é alocar réplicas das parcelas existentes, aumentando a representatividade das medidas e estimativas realizadas.

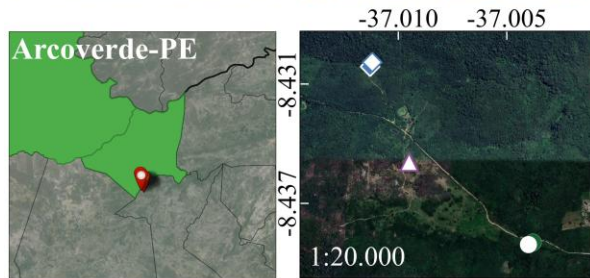
Georreferenciamento das parcelas

Após a instalação de cada parcela, foi feito seu georreferenciamento *in loco*, coletando a coordenada geográfica do ponto central de cada

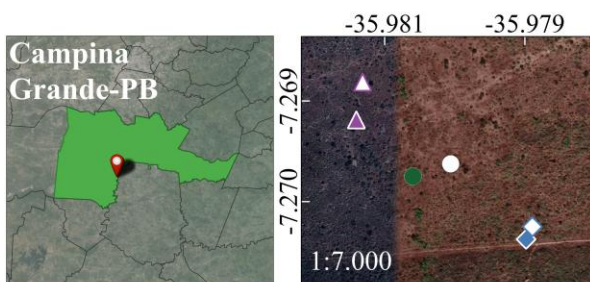
parcela utilizando GPS. Os dados das coordenadas geográficas estão listados na Figura 3.



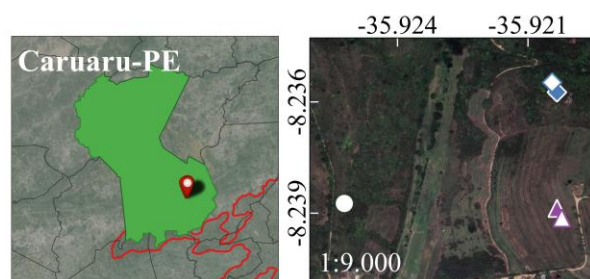
Áreas experimentais	Longitude	Latitude
Caatinga densa com exclusão de animais	-40,4157	-7,4653
Caatinga aberta com exclusão de animais	-40,4155	-7,4652
Pastagem com exclusão de animais	-40,4153	-7,4650



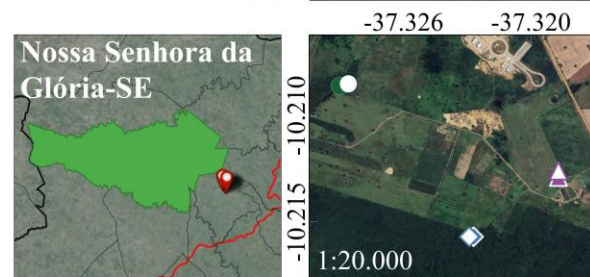
Áreas experimentais	Longitude	Latitude
Caatinga densa com exclusão de animais	-37,0113	-8,4307
Caatinga aberta com exclusão de animais	-37,0038	-8,4388
Caatinga densa sem exclusão de animais	-37,0112	-8,4305
Caatinga aberta sem exclusão de animais	-37,0040	-8,4389
Pastagem sem exclusão de animais	-37,0095	-8,4351



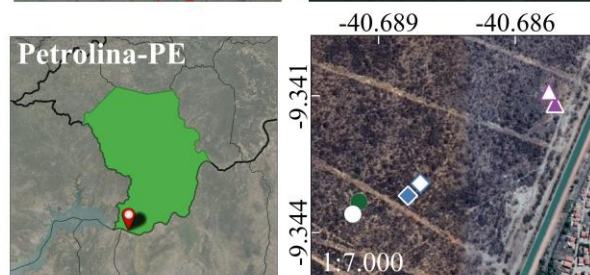
Áreas experimentais	Longitude	Latitude
Caatinga densa com exclusão de animais	-35,9788	-7,2710
Caatinga aberta com exclusão de animais	-35,9806	-7,2700
Pastagem com exclusão de animais	-35,9815	-7,2691
Caatinga densa sem exclusão de animais	-35,9787	-7,2708
Caatinga aberta sem exclusão de animais	-35,9800	-7,2698
Pastagem sem exclusão de animais	-35,9814	-7,2685



Áreas experimentais	Longitude	Latitude
Caatinga densa com exclusão de animais	-35,9202	-8,2361
Caatinga aberta com exclusão de animais	-35,9246	-8,2384
Pastagem com exclusão de animais	-35,9202	-8,2385
Caatinga densa sem exclusão de animais	-35,9203	-8,2359
Caatinga aberta sem exclusão de animais	-35,9246	-8,2384
Pastagem sem exclusão de animais	-35,9201	-8,2387



Áreas experimentais	Longitude	Latitude
Caatinga densa com exclusão de animais	-37,3227	-10,2157
Caatinga aberta com exclusão de animais	-37,3290	-10,2086
Pastagem com exclusão de animais	-37,3187	-10,2129
Caatinga densa sem exclusão de animais	-37,3229	-10,2157
Caatinga aberta sem exclusão de animais	-37,3286	-10,2085
Pastagem sem exclusão de animais	-37,3187	-10,2126



Áreas experimentais	Longitude	Latitude
Caatinga densa com exclusão de animais	-40,6881	-9,3431
Caatinga aberta com exclusão de animais	-40,6889	-9,3432
Pastagem com exclusão de animais	-40,6857	-9,3416
Caatinga densa sem exclusão de animais	-40,6879	-9,3429
Caatinga aberta sem exclusão de animais	-40,6890	-9,3434
Pastagem sem exclusão de animais	-40,6858	-9,3414

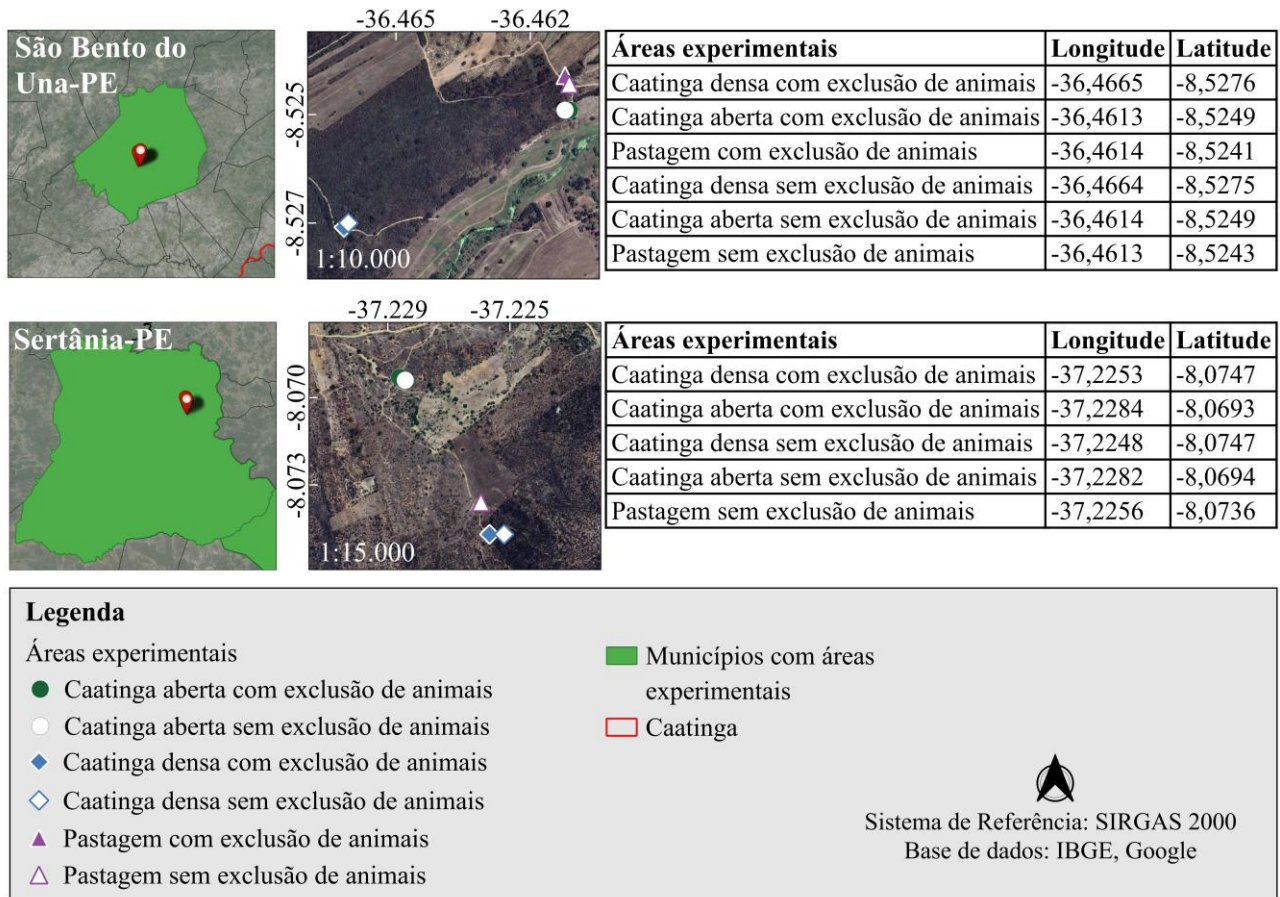


Figura 3. Localização das áreas experimentais da Rede de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração no Nordeste Semiárido (PERENE).

Variáveis ambientais monitoradas por sensoriamento remoto

As variáveis ambientais monitoradas por SR permitiram uma análise temporal das áreas de estudo. Dentre as variáveis monitoradas, destacam-se a cobertura vegetal, a precipitação, a evapotranspiração real, e a temperatura de superfície, essenciais para compreender a dinâmica e as interações nos ecossistemas da Caatinga.

Os dados de chuva foram obtidos utilizando o *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data* (CHIRPS) (Funk et al., 2015), que permitem uma análise da disponibilidade hídrica. Já os dados de evapotranspiração (ET) foram obtidos do *Seasonal Tropical Ecosystem Energy Partitioning* (STEPP) (Bezerra et al., 2023), possibilitando compreender a demanda hídrica da vegetação em diferentes períodos e condições ambientais.

O STEEP é um modelo de balanço de energia na superfície que utiliza dados de SR para estimar a evapotranspiração em florestas tropicais sazonalmente secas, como a Caatinga. Esse modelo foi desenvolvido para considerar características específicas dessas florestas, como as diferentes fases fenológicas das plantas e a disponibilidade de

água no solo (Bezerra et al., 2023; Silva Neto et al., 2024).

Para avaliar a cobertura vegetal e sua produtividade, foram utilizados o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Produção Primária Bruta (GPP) e Produção Primária Líquida (NPP), obtidos do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Esses dados são fundamentais para entender o desempenho da vegetação em relação ao uso forrageiro. O NDVI é um indicador amplamente utilizado para avaliar a dinâmica e atividade fotossintética da vegetação (Silva Filho et al., 2020). Esse índice é estimado a partir da reflectância da luz vermelha e infravermelha próxima (Rouse Jr. et al., 1974), conforme a Equação 1:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Em que:

NIR – Valor de reflectância na banda do infravermelho;

RED – Valor da reflectância na banda do vermelho.

O NDVI varia de -1 a 1. Valores próximos de 1 indicam áreas com alta densidade de vegetação saudável, enquanto valores próximos de 0 representam áreas com pouca ou nenhuma vegetação. Valores negativos indicam a presença de corpos d'água ou nuvens (Huang et al., 2021). Para sua obtenção, foi utilizado o produto MODIS MOD13Q1 V6.1, que apresenta refletâncias de superfície corrigidas atmosféricamente e mascaradas para água, nuvens, aerossóis pesados e sombras de nuvens, com resolução espacial de 250 metros (Didan, 2021).

O GPP representa a quantidade total de energia solar capturada pelas plantas através da fotossíntese durante um determinado período (Joiner e Yoshida, 2020; Zhang e Ye, 2021). Em outras palavras, é a quantidade total de energia que as plantas convertem em biomassa vegetal. O NPP é a parte do GPP que as plantas utilizam para se desenvolver, após descontar as perdas energéticas durante o processo de respiração vegetal (Santini et al., 2010). Assim, o NPP representa a biomassa líquida produzida pelas plantas. Um NPP positivo indica que a biomassa produzida pelas plantas durante um determinado período é maior do que a energia que elas usam para suas atividades metabólicas (respiração). Isso significa que as plantas estão crescendo e acumulando biomassa, o que é geralmente considerado um indicador de um ecossistema saudável e produtivo. Um NPP positivo também contribui para o armazenamento de carbono na biomassa vegetal e retirada de dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera, ajudando a mitigar os efeitos das mudanças climáticas.

Ambos GPP e NPP são medidas importantes para compreender a atividade fotossintética, a dinâmica da vegetação, a produtividade das plantas e as interações que ocorrem no ecossistema (Chu et al., 2016), especialmente em ambientes como a Caatinga, onde a disponibilidade de água e as condições climáticas influenciam significativamente a atividade das plantas (Moraes et al., 2017). Para o monitoramento dessas duas variáveis ambientais, utilizou-se o produto MODIS MOD17A3HGF V6.1, que fornece dados anuais de GPP e NPP com resolução espacial de 500 m.

A temperatura de superfície influencia diretamente a evapotranspiração. Sendo muito útil

para a análise das condições ambientais em regiões semiáridas (Santos et al., 2020b). Para monitorar essa variável, foram utilizados os dados do dia e da noite dos produtos MOD21C3 e MYD21C3, com resolução espacial de 1 km. Esses conjuntos de dados são uma composição mensal baseada na média de aquisições diárias sem nuvem no período de 8 dias (Hulley e Hook, 2021a, 2021b).

Todo o processamento e análise dos dados de SR foram feitos utilizando a plataforma de computação em nuvem Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). A obtenção das imagens dos satélites e das variáveis ambientais foi feita em intervalos regulares de janeiro de 2012 a dezembro de 2022. A restrição do período de observação até 2022 deve-se à falta de disponibilidade de dados do GPP e NPP para períodos subsequentes.

Resultados e discussão

Entre 2012 e 2022, as unidades experimentais registraram variações anuais de precipitação significativas (Figura 4). Destacam-se as unidades experimentais localizadas em Petrolina/PE e Nossa Senhora da Glória/SE e como extremos, registrando a menor maior e maior média anual de precipitação, 393 mm e 801 mm, respectivamente. Comparando esses dados com outras áreas da Caatinga, observa-se que esta variabilidade está de acordo com Pinheiro et al. (2020), Silva et al. (2024d) e Vieira et al. (2022), que obtiveram valores de precipitação anual médios entre 431 e 857 mm, representando os extremos do bioma Caatinga.

Essa diferença entre os totais médios anuais de precipitação evidencia a diversidade pluviométrica que as diferentes formações de vegetação Caatinga estão submetidos. Essa diversidade está intrinsecamente ligada à região Nordeste do Brasil, na qual o bioma está majoritariamente situado, e é influenciada pela interação de diversos sistemas atmosféricos, em diferentes escalas espaço-temporais, tais como zona de convergência intertropical (ZCIT), vórtice ciclônico de altos níveis (VCAN), distúrbios ondulatórios de leste (DOLs), Dipolo do Atlântico e fenômeno ENOS (El Niño Oscilação Sul) (Carmo e Lima, 2020; Dantas et al., 2020; Silva et al., 2019, 2021).

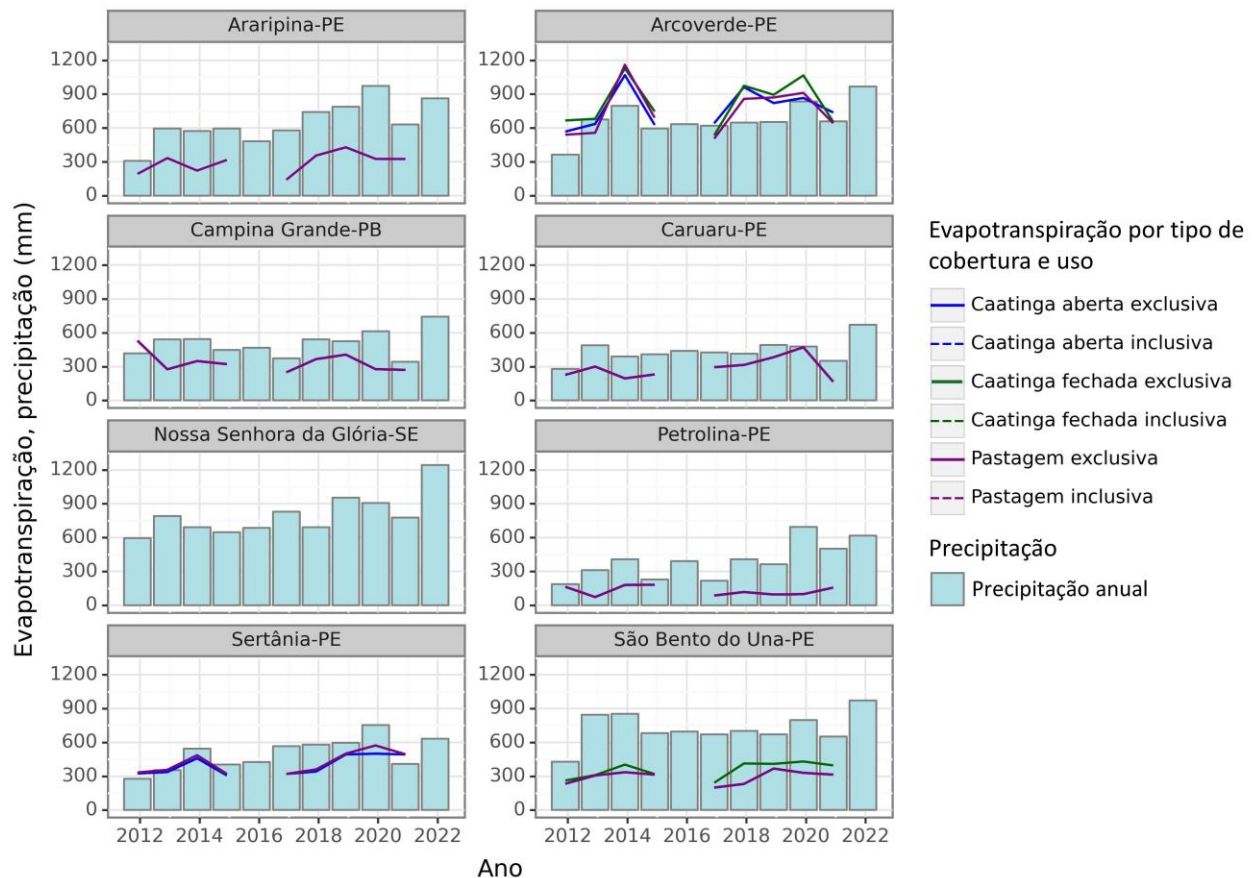


Figura 4. Série temporal da evapotranspiração e precipitação anual das unidades experimentais

A análise da precipitação apresenta desafios específicos devido à resolução espacial dos dados disponíveis. Devido ao tamanho do pixel do CHIRPS de aproximadamente 5 km, não é possível diferenciar as precipitações específicas em uma mesma unidade experimental, que se diferenciam pelo tipo de cobertura (caatinga fechada, caatinga aberta ou pastagem) e uso (com ou sem exclusão). Essa limitação não é exclusiva do CHIRPS, mas também ocorre em outras bases de dados de precipitação com resoluções espaciais similares (Chen et al., 2020).

Assim, embora o CHIRPS seja um produto amplamente utilizado para análises climáticas em escalas regional e global (ex. Andrade et al., 2022; Shen et al., 2020), em estudos que requerem resolução espacial mais detalhada, como a necessária para diferenciar as precipitações específicas de cada parcela, é necessário complementar os dados com outras técnicas de SR ou medições *in loco*.

Este aspecto ganha especial relevância em locais como Arcoverde/PE, onde a razão entre evapotranspiração e precipitação (ET/P) média anual atingiu 1,20 (Figura 4). O valor de ET/P superior a 1 indica uma condição em que mais água está retornando para a atmosfera do que sendo

fornecida pela chuva. Essa situação sugere a possibilidade de um déficit hídrico na área, o que poderia comprometer a disponibilidade de recursos hídricos. Nesse caso, uma possível subestimativa da precipitação pode influenciar esta relação.

Nos anos analisados, com base nos dados do CHIRPS, apenas 2014, 2020 e 2022 registraram precipitações acima da média anual de 700 mm (Costa et al., 2021; Silva, Silva e Santos, 2019), sendo 2022 o ano mais chuvoso, com um total acumulado de 968 mm. Nos demais anos, os valores foram inferiores à média, sendo 2012 o ano mais seco, com apenas 364 mm.

Dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2024) para esses mesmos anos revelam precipitações de 353 mm em 2012, 666 mm em 2014, 1.099 mm em 2020 e 1.040 mm em 2022. Comparando essas informações com o CHIRPS, observa-se uma tendência mista no produto, que superestimou a precipitação em 2012 e 2014, mas subestimou em 2020 e 2022. Essa discrepância sugere que o CHIRPS tende a suavizar os extremos de precipitação, especialmente em anos muito secos ou muito chuvosos.

A variabilidade da precipitação também se reflete nos valores mensais (Figura 5). Durante a

seca de 2012 a 2017, que afetou todas as unidades experimentais, foram raros os eventos de precipitação elevada. Um desses eventos ocorreu em agosto de 2014 em São Bento do Una/PE, onde foi registrada uma precipitação mensal de 271 mm, muito acima da média histórica de 34 mm para esse mês (Medeiros et al., 2020). A APAC (2024) registrou apenas 63,3 mm para o mesmo mês.

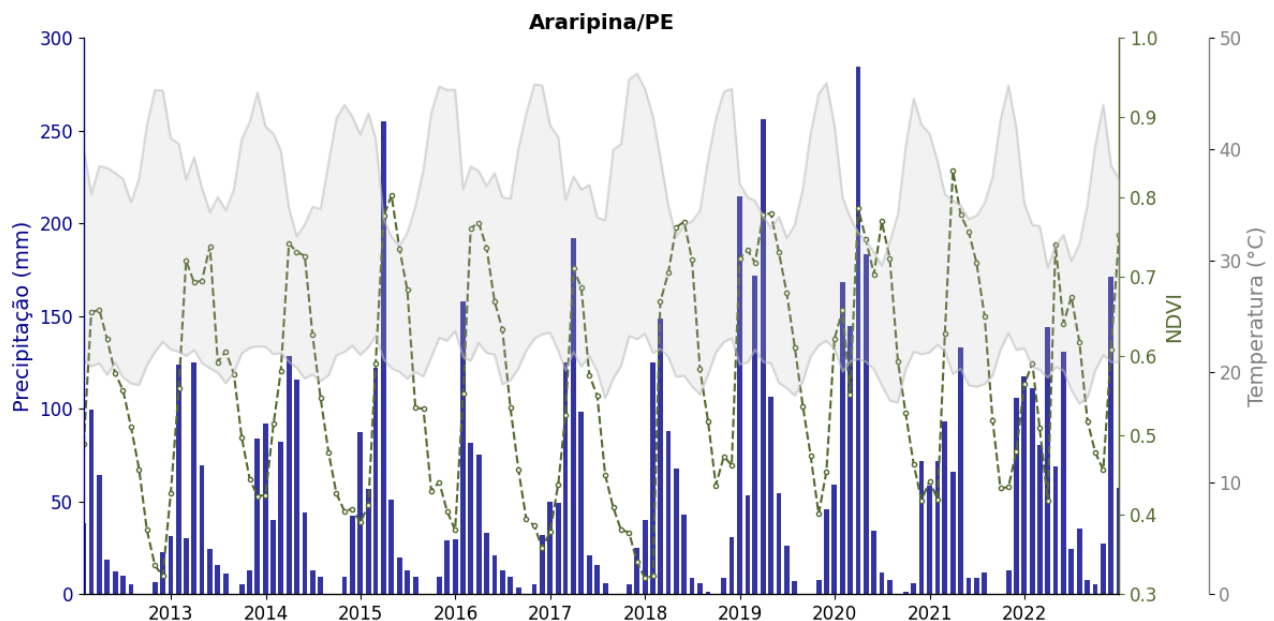
Em relação a evapotranspiração, Lins et al. (2017) reportaram, em seu estudo realizado no município de Arcoverde/PE, uma média de 748 mm ano⁻¹ para 2015. Valor próximo ao encontrado no presente estudo, de 770 mm ano⁻¹ para todo período de estudo e de 627 mm especificadamente em 2015.

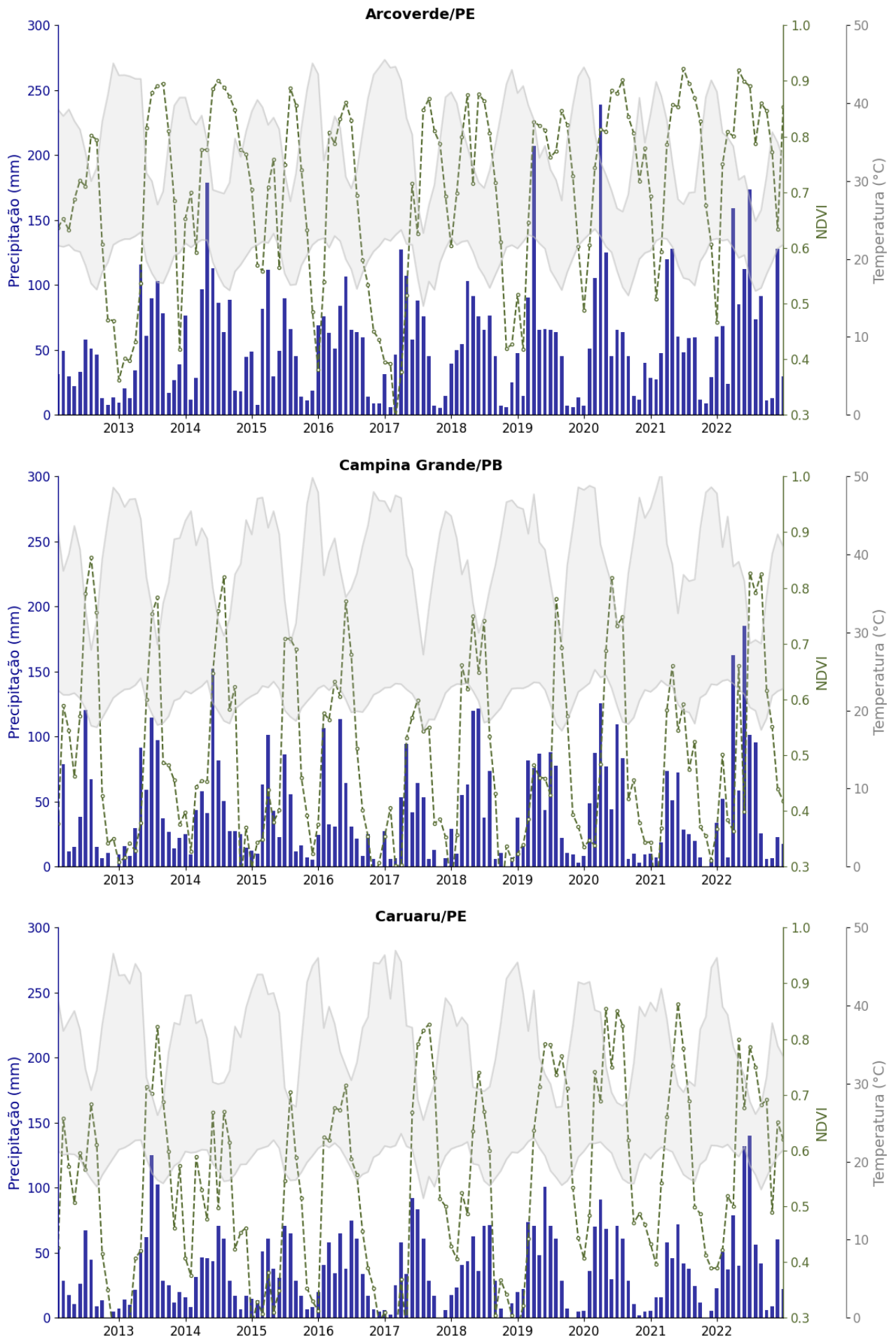
Em contraste com as condições observadas em Arcoverde/PE, São Bento do Una/PE apresentou uma realidade oposta em termos de disponibilidade hídrica. Nesse município, as áreas experimentais apresentaram ET/P média anual de 0,43, evidenciada na Figura 4. Esse valor indica que a água está sendo armazenada no solo, contribuindo para uma maior umidade do solo e escoamento superficial na região.

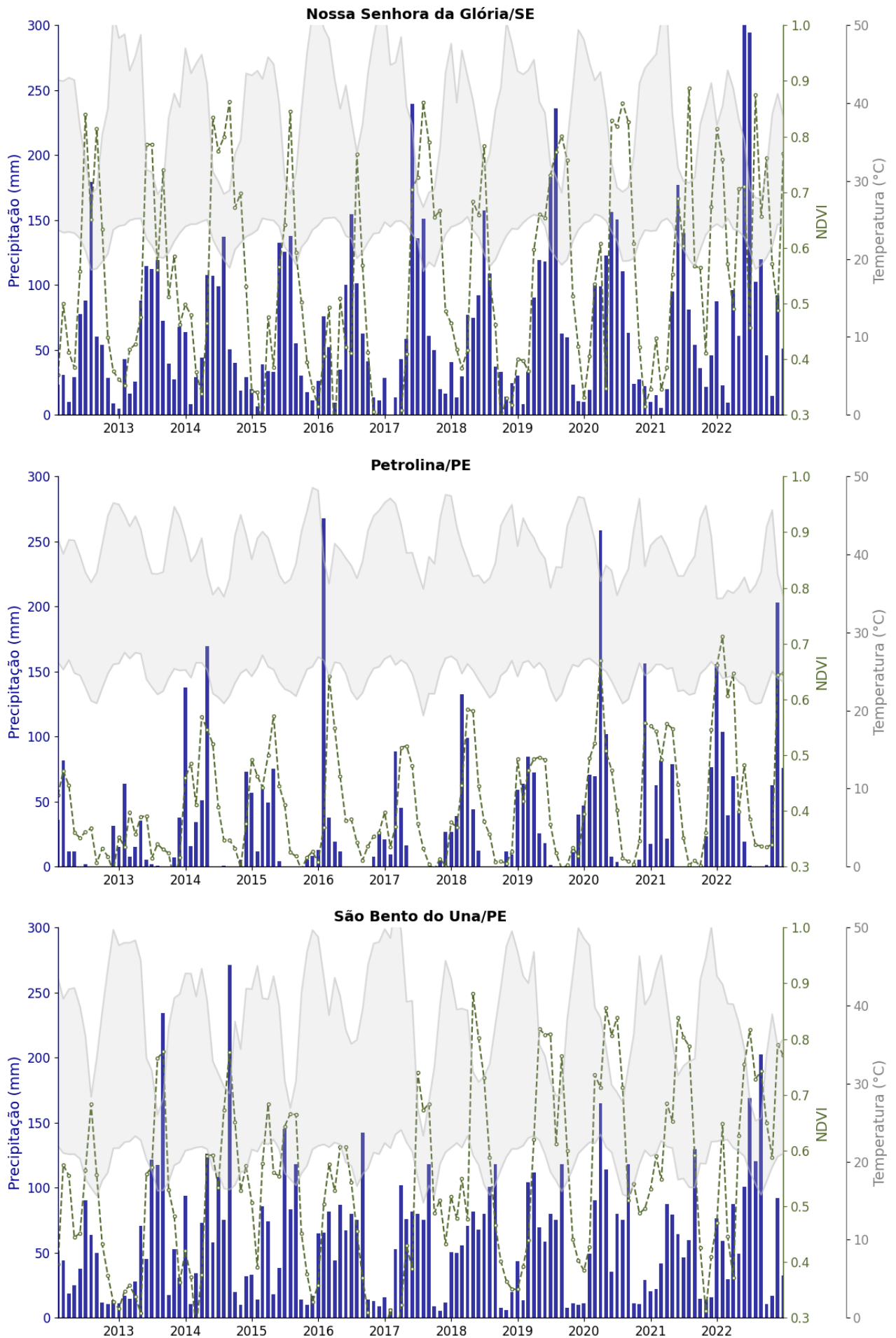
Ainda ao analisar a ET, a ausência de valores de evapotranspiração para os anos de 2016 e 2022 é atribuída às limitações nos dados de entrada do STEEP, o que impossibilitou sua estimativa para esses anos. Além disso, o pixel do STEEP tem uma resolução espacial de 1 km. Isso

significa que, em alguns casos, houve sobreposição dos valores de ET para os diferentes tipos de cobertura e uso. Outro ponto a ser destacado é a ausência de dados de ET para o município de Nossa Senhora da Glória/SE. Nesse caso, a proximidade das unidades experimentais com o limite do bioma Caatinga, definido na camada de dados espaciais (shapefile), impediu a aquisição dos dados pelo modelo.

A variação espaço-temporal da precipitação na Caatinga tem implicações multifacetadas. A disponibilidade de água para a população e os animais, a agricultura e o desenvolvimento socioeconômico da região são diretamente afetados por essa diversidade de padrões pluviométricos. Além disso, a alta variabilidade condiciona o comportamento fenológico da vegetação na Caatinga (Moraes et al., 2017), que tem espécies xerófitas e caducifólias, com folhas pequenas e espinhos, adaptadas a períodos de baixa disponibilidade hídrica. Essa adaptação é refletida no NDVI. Em um ambiente onde as chuvas são irregulares, a resposta rápida da Caatinga às precipitações é notável. Assim que o período chuvoso começa, a temperatura de superfície diminui e o NDVI tem um aumento expressivo (Figura 5).







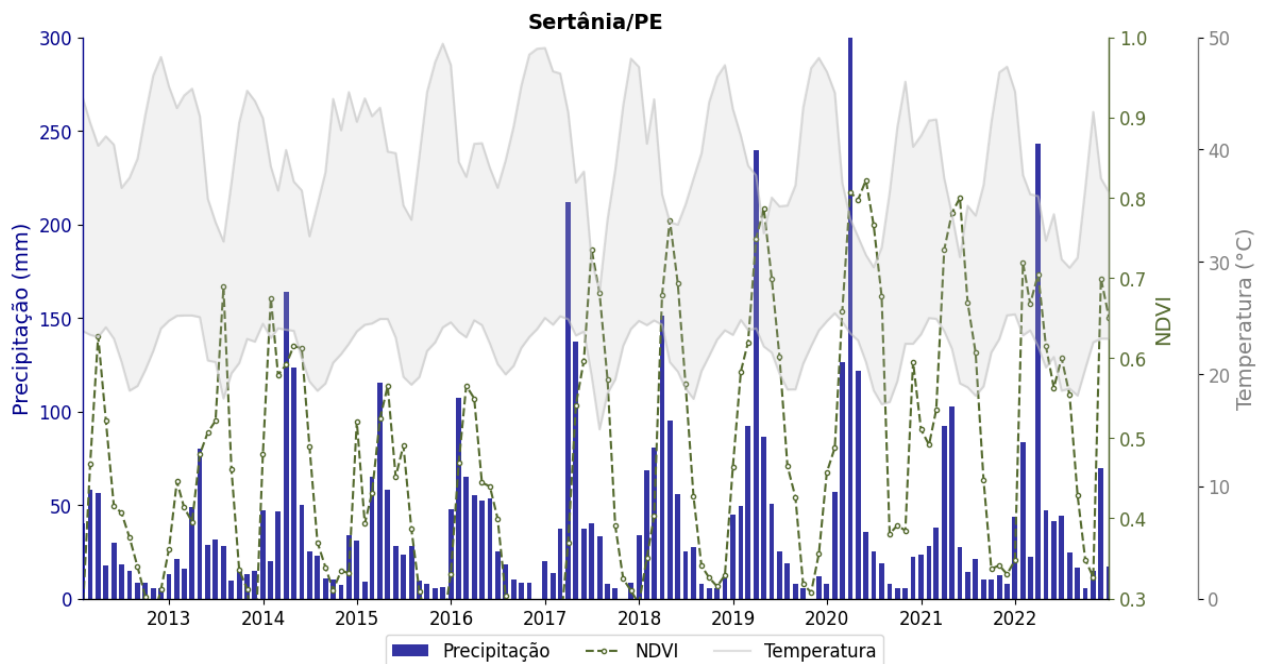


Figura 5. Série temporal de precipitação, NDVI e temperatura mensal nas unidades experimentais.

Os picos de NDVI indicam aumento rápido na atividade vegetal e no acúmulo de biomassa à medida que as plantas respondem à disponibilidade de água. Esses períodos de alta atividade vegetal são seguidos por diminuição do NDVI à medida que a água disponível é utilizada e as condições secas retornam. Os resultados apontam que os valores de NDVI oscilaram entre 0,22 e 0,92 (Figura 5).

A relação entre a disponibilidade de água e a produtividade da vegetação é esperada em muitos ecossistemas (Silva et al, 2024d). Quando ocorrem anos mais chuvosos, a quantidade adicional de água disponível no solo pode aumentar a capacidade das plantas para realizar a fotossíntese, contribuindo também para o aumento do GPP e NPP.

Ao analisar os dados de fluxo de carbono, destaca-se novamente Arcoverde/PE por apresentar os valores mais elevados de GPP e NPP (Figura 6), indicando alta atividade fotossintética das plantas. Naturalmente, os picos de GPP e NPP coincidiram com os anos mais chuvosos,

demonstrando a influência direta da disponibilidade de água na produtividade vegetal.

A Caatinga atuou como sumidouro de carbono em todas as áreas experimentais, mesmo durante os anos de seca severa. No presente estudo, foi observada uma média de $899 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ para NPP e $1528 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ para GPP. Corroborando os achados de Pereira et al. (2020) e Oliveira et al. (2022) em áreas de Caatinga. Na Bahia, Pereira et al. (2020) observaram média de $913,81 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ entre 2003 e 2019. Enquanto, Oliveira et al. (2022) reportaram médias mensais de GPP no período chuvoso de $171,59 \text{ g C m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ em caatinga fechada e $128,40 \text{ g C m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ na região de caatinga aberta. Na estação seca, esses valores caíram para $128,41 \text{ g C m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ e $98,26 \text{ g C m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ nas áreas de caatinga fechada e aberta, respectivamente.

Essa consistência nos resultados reforça a importância do ecossistema da Caatinga como um regulador significativo do ciclo de carbono.

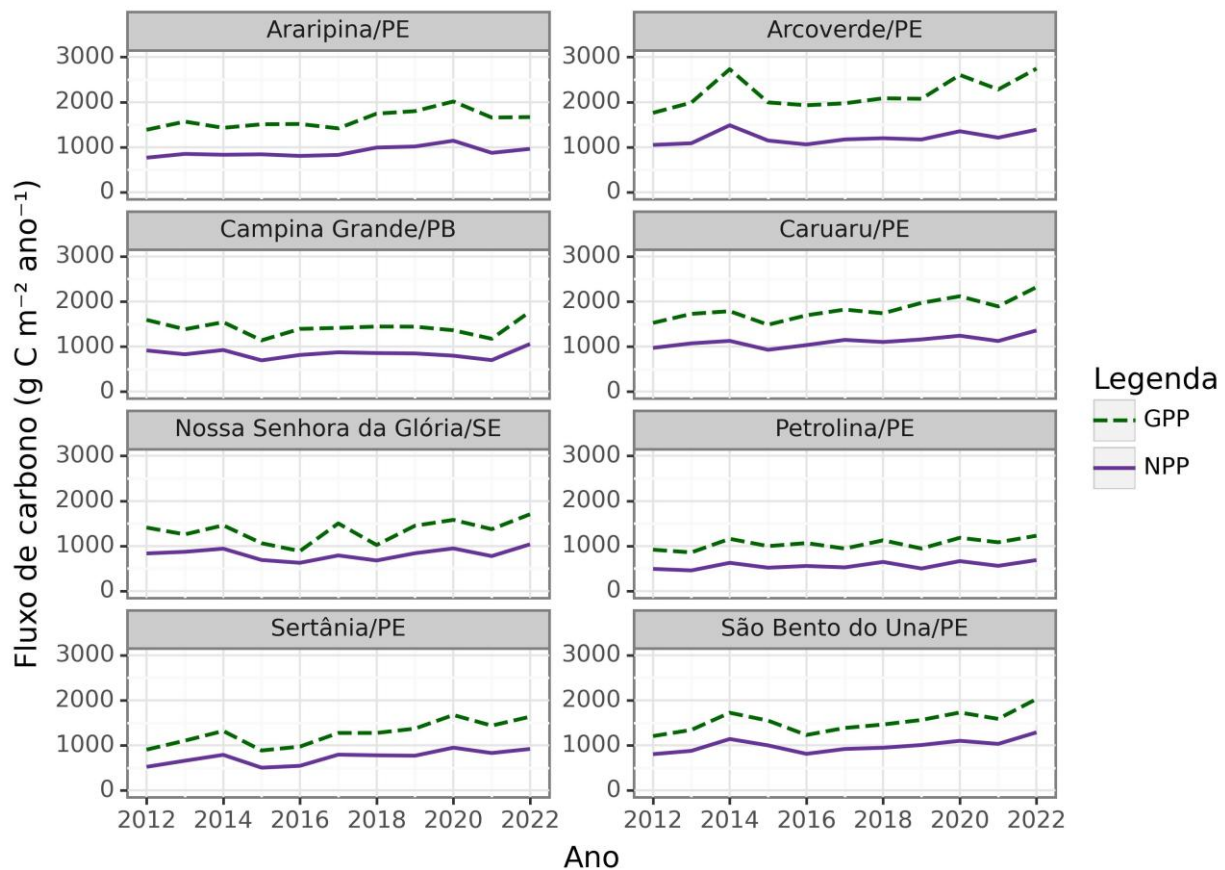


Figura 6. Séries temporais de fluxo de carbono nas unidades experimentais.

Conclusão

Os dados de chuva revelam uma notável disparidade entre as áreas estudadas. Nossa Senhora da Glória/SE, destacou-se como uma das áreas mais chuvosas e Petrolina/PE, uma das menos chuvosas. Essa variabilidade climática ilustra a natureza heterogênea nas diversas formações que a Caatinga está submetida, influenciando diretamente a dinâmica e a diversidade desse ecossistema.

A coincidência dos picos de NDVI, GPP e NPP com os anos mais chuvosos sugere forte influência da precipitação na produtividade do ecossistema e ressalta a importância de considerar não apenas a média anual, mas também a distribuição sazonal das chuvas ao estudar a dinâmica da vegetação na Caatinga.

O estudo destaca a complexidade do bioma e a importância de estudos de longo prazo para compreender melhor suas dinâmicas e as respostas às mudanças ambientais. A implementação de parcelas permanentes de longa duração permite uma análise abrangente das interações entre os diferentes elementos do ecossistema e a identificação de padrões relevantes para o manejo sustentável e a conservação da Caatinga.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processos 316773/2021–2 e 409341/2021–5), da Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ, processos 010/2021 e 403/2021), da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do estado de Pernambuco (FACEPE, processo APQ-0500-5.01-22) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processo 2022/07490-2). Este trabalho faz parte do Observatório Nacional de Dinâmica da Água e Carbono no Bioma Caatinga (ONDACBC), apoiado pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE; APQ-0498-3.07/17 ONDACBC), CNPq (processos 441305/2017-2 e 465764/2014-2) e CAPES (processo 88887.136369/2017-00). O segundo autor agradece ao CNPq pela bolsa de pós-doutorado júnior (PDJ 152019/2022-7).

Referências

Alves, J. J. A., Araújo, M. A. de, & Nascimento, S. S. (2008). Degradação da Caatinga: uma investigação ecogeográfica. *Caminhos de*

- Geografia*, 9(27), 143–155.
<https://doi.org/10.14393/RCG92715740>
- Andrade, J. M. de, Ribeiro Neto, A., Bezerra, U. A., Moraes, A. C. C., & Montenegro, S. M. G. L. (2022). A comprehensive assessment of precipitation products: Temporal and spatial analyses over terrestrial biomes in Northeastern Brazil. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28(September), 100842. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100842>
- APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. (2024). Histórico de chuvas. Disponível: <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>. Acesso em 14 de dezembro de 2024.
- Araújo Filho, J. A. de. (2013). *Manejo pastoril sustentável da caatinga*. Projeto Dom Helder Câmara.
- Barbosa Neto, M. V., Araújo, M. do S. B. de, Araújo Filho, J. C. de, Sampaio, E. V. de S. B., & Almeida, B. G. de. (2021). Rill and sheet soil erosion estimation in an area undergoing desertification in the Brazilian semi-arid region. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(2), 1183–1191. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01026-y>
- Bezerra, U. A., Cunha, J., Valente, F., Nóbrega, R. L. B., Andrade, J. M., Moura, M. S. B., Verhoef, A., Perez-Marin, A. M., & Galvão, C. O. (2023). STEEP: A remotely-sensed energy balance model for evapotranspiration estimation in seasonally dry tropical forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 333(February), 109408. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109408>
- Carmo, M. V. N. S. do, & Lima, C. H. R. (2020). Caracterização espaço-temporal das secas no Nordeste a partir da análise do índice SPI. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35(2), 233–242. <https://doi.org/10.1590/0102-7786352016>
- Chen, C., Li, Z., Song, Y., Duan, Z., Mo, K., Wang, Z., & Chen, Q. (2020). Performance of multiple satellite precipitation estimates over a typical arid mountainous area of China: Spatiotemporal patterns and extremes. *Journal of Hydrometeorology*, 21(3), 533–550. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0167.1>
- Chu, C., Bartlett, M., Wang, Y., He, F., Weiner, J., Chave, J., & Sack, L. (2016). Does climate directly influence NPP globally? *Global Change Biology*, 22(1), 12–24. <https://doi.org/10.1111/gcb.13079>
- Comitê Técnico Científico da Rede de Manejo Florestal da Caatinga. (2005). *Rede de manejo florestal da caatinga: Protocolo de medições de parcelas permanentes*. Associação Plantas do Nordeste.
- Costa, G. B., Mendes, K. R., Viana, L. B., Almeida, G. V., Mutti, P. R., Silva, C. M. S., Bezerra, B. G., Marques, T. V., Ferreira, R. R., Oliveira, C. P., Gonçalves, W. A., Oliveira, P. E., Campos, S., Andrade, M. U. G., Antonino, A. C. D., & Menezes, R. S. C. (2022). Seasonal ecosystem productivity in a seasonally dry tropical forest (Caatinga) using flux tower measurements and remote sensing data. *Remote Sensing*, 14(16), 3955. <https://doi.org/10.3390/rs14163955>
- Costa, S., Bezerra, A., Araújo, A., Silva, M., Neto, J., Alves, R., & Souza, L. (2021b). Dinâmica espaço-temporal das anomalias de precipitação em uma região semiárida, Nordeste do Brasil. *Revista de Gestão de Água Da América Latina*, 18(1), 14–0. <https://doi.org/10.21168/rega.v18e14>
- Costa, T. C. e C. da, Oliveira, M. A. J. de, Accioly, L. J. de O., & Silva, F. H. B. B. da. (2009). Análise da degradação da caatinga no núcleo de desertificação do Seridó (RN/PB). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13(suppl), 961–974. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000700020>
- Costa, T. L., Sampaio, E. V. S. B., Araújo, E. L., Silva, A. F., & Freitas, A. D. S. (2021a). Contributions of Leguminosae to young and old stands of neotropical forests under different environmental conditions. *Annals of Forest Science*, 78(2), 48. <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01065-0>
- Dantas, L. G., Santos, C. A. C. dos, Olinda, R. A. de, Brito, J. I. B. de, Santos, C. A. G., Martins, E. S. P. R., de Oliveira, G., & Brunsell, N. A. (2020). Rainfall prediction in the state of Paraíba, Northeastern Brazil using generalized additive models. *Water*, 12(9), 2478. <https://doi.org/10.3390/w12092478>
- Didan, K. (2021). MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061. *NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center*.
- Ferreira, A. C. D., de Oliveira, F. L., do Nascimento Lima, J. U., Nascimento, G. A., da Costa Torreão, J. N., Marques, C. A. T., Dias-Silva, T. P., Gurgel, A. L. C., & de Araújo, M. J. (2024). Seasonal variations in botanical and nutritive composition, forage availability and ingestive behavior of grazing goats in the semiarid region. *Tropical Animal Health and Production*, 56(1), 36. <https://doi.org/10.1007/s11250-024-03886-3>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J.,

- Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 1–21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gariglio, M. A., Sampaio, E. V. de S. B., Cestaro, L. A., & Kageyama, P. Y. (2010). *Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga*. Serviço Florestal Brasileiro.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Guimaraes, A. F., Querido, L. C. A., Rocha, T., Rodrigues, D. J., Viana, P. L., Bergallo, H. G., Fernandes, G. W., Toma, T. S. P., Streit, H., Overbeck, G. E., Souza, A. Q. S., Lima, A. P., Rosa, C. A., Grelle, C. E. V., Lopes, A. M., Curcino, A., Souza de Paula, A., Andriolo, A., ... Magnusson, W. E. (2024). Disentangling the veil line for Brazilian biodiversity: An overview from two long-term research programs reveals huge gaps in ecological data reporting. *Science of The Total Environment*, 950, 174880. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174880>
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Hulley, G., & Hook, S. (2021a). MODIS/Aqua Land Surface Temperature/3-Band Emissivity Monthly L3 Global 0.05Deg CMG V061 [Data set]. *NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center*.
- Hulley, G., & Hook, S. (2021b). MODIS/Terra Land Surface Temperature/3-Band Emissivity Monthly L3 Global 0.05Deg CMG V061 [Data set]. *NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center*.
- Joiner, J., & Yoshida, Y. (2020). Satellite-based reflectances capture large fraction of variability in global gross primary production (GPP) at weekly time scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291, 108092. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108092>
- Lima, J. R. S., Souza, R. M. S., Sampaio, E. V. S. B., Antonino, A. C. D., Souza, E. S., Medeiros, É. V., Duda, G. P., Ferreira, C. R. P. C., Menezes, R. S. C., & Hammecker, C. (2023). Moisture, temperature and respiration of two soil classes under pasture and tropical dry forest in the semiarid Brazilian region. *Journal of Arid Environments*, 214, 104981. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.104981>
- Lins, F. A. C., Araújo, D. C. D. S., Silva, J. L. B. da, Lopes, P. M. O., Oliveira, J. D. A., & Silva, A. T. C. S. G. da. (2017). Estimativa de parâmetros biofísicos e evapotranspiração real no semiárido pernambucano utilizando sensoriamento remoto. *IRRIGA*, 1(1), 64–75. <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v1n1p64-75>
- Medeiros, R. M. de, França, M. V. de, Saboya, L. M. F., Rolim Neto, F. C., Holanda, R. M. de, & Araújo, W. R. de. (2020). Influência do El Niño e La Niña na precipitação em São Bento do Una - Pernambuco, Brasil. *Research, Society and Development*, 9(12), e29791211074. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i12.11074>
- Menezes, R. S. C., Sales, A. T., Primo, D. C., Marinho de Albuquerque, E. R. G., Nascimento de Jesus, K., Pareyn, F. G. C., Santana, M. S., Santos, U. J., Martins, J. C. R., Althoff, T. D., Nascimento, D. M., Gouveia, R. F., Fernandes, M. M., Loureiro, D. C., Araújo Filho, J. C., Giongo, V., Duda, G. P., Alves, B. J. R., Mello Ivo, W. M. P., Andrade, E. M., Pinto, A. S., & Sampaio, E. V. S. B. (2021). Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. *Geoderma*, 390, 114943. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114943>
- Morais, Y. C. B., Araújo, M. do S. B. de, Moura, M. S. B. de, Galvêncio, J. D., & Miranda, R. de Q. (2017). Análise do sequestro de carbono em áreas de Caatinga do semiárido pernambucano. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(4), 585–599. <https://doi.org/10.1590/0102-7786324007>
- Nascimento, D. M., Sales, A. T., Souza, R., Silva, A. S. A., Sampaio, E. V. S. B., & Menezes, R. S. C. (2022). Development of a methodological approach to estimate vegetation biomass using remote sensing in the Brazilian semiarid NE region. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 27, 100771. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100771>
- Oliveira, A. F. N., Sousa, L. I. S., Costa, V. A. S., Andrade, J. V. T., Lima, L. A. L., Sales, P. A. F., Silva, D. F., Pereira, A. P. A., & Melo, V. M. M. (2021b). Long-term effects of grazing on the biological, chemical, and physical soil properties of the Caatinga biome. *Microbiological Research*, 253, 126893. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126893>

- Oliveira, M. L., Santos, C. A. C., Oliveira, G., Pérez-Marín, A. M., & Santos, C. A. G. (2021a). Effects of human-induced land degradation on water and carbon fluxes in two different Brazilian dryland soil covers. *Science of The Total Environment*, 792, 148458. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148458>
- Oliveira, M. L., Santos, C. A. C., Oliveira, G., Silva, M. T., Silva, B. B., Cunha, J. E. B. L., Ruhoff, A., & Santos, C. A. G. (2022). Remote sensing-based assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil. *Science of The Total Environment*, 835, 155490. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155490>
- Oliveira, P. S., Falcão, L. A. D., Almeida, J. S., Fernandes, G. W., Reis Júnior, R., Nunes, Y. R. F., Veloso, M. das D. M., Beirão, M. do V., Neves, F. de S., Solar, R. R. C., Borges, M. A. Z., Silva, A. C., Salomão, R. P., Iannuzzi, L., Silva, L. F., Cabral, G. A. L., Sampaio, E. V. S. B., Macedo-Reis, L. E., Santos, C. F., Kerpel, S. M., Souza, R. M., Cardoso, I. G. S., & Espírito Santo, M. M. do. (2024). Diversity patterns along ecological succession in tropical dry forests: A multi-taxonomic approach. *Oikos*, e09653. <https://doi.org/10.1111/oik.09653>
- Oresca, D., Souza, E. S. de, Souza, R. M. S., Silva, J. R. I., Moura, D. P. de, Sampaio, E. V. de S. B., Hammecker, C., Lima, J. R. de S., Menezes, R. S. C., Pessoa, L. G. M., Ferrão, N. G. de M., & Antonino, A. C. D. (2024). Impact of conversion of the Caatinga forest to different land uses on soil and root respiration dynamics in the Brazilian semiarid region. *Sustainability*, 16(23), 10652. <https://doi.org/10.3390/su162310652>
- Pereira, M. P. S., Mendes, K. R., Justino, F., Couto, F., Silva, A. S. da, Silva, D. F. da, & Malhado, A. C. M. (2020). Brazilian dry forest (Caatinga) response to multiple ENSO: The role of Atlantic and Pacific Ocean. *Science of The Total Environment*, 705, 135717. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135717>
- Pinheiro, K. R., Alves, E. R., Alves, M. V., & Galvêncio, J. D. (2020). Impacto da precipitação e do uso e ocupação do solo na cobertura vegetal na Caatinga. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 5(2), 221–231. <https://doi.org/10.24221/jeap.5.2.2020.3058.221-231>
- Ribeiro, K., Sousa-Neto, E. R. de, Carvalho, J. A. de, Sousa Lima, J. R. de, Menezes, R. S. C., Duarte-Neto, P. J., da Silva Guerra, G., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.095>
- Rouse Jr., J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, 1(A), 309–317.
- Santini, M., Caccamo, G., Laurenti, A., Noce, S., & Valentini, R. (2010). A multi-component GIS framework for desertification risk assessment by an integrated index. *Applied Geography*, 30(3), 394–415. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2009.11.003>
- Santos, C. V. B., Carvalho, H. F. S., Silva, M. J., Moura, M. S. B. de, & Galvêncio, J. (2020b). Uso de Sensoriamento Remoto na análise da temperatura da superfície em áreas de floresta tropical sazonalmente seca. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(3), 941–957. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.3.p941-957>
- Santos, L. S., Barros Silva, H. P., Pereira, E. C. G., & Silva, H. A. (2020a). Variação da cobertura vegetal com ênfase na identificação de mancha de cerrado em um perfil topográfico do semiárido pernambucano - Brasil. *Sociedade & Natureza*, 32, 335–345. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-45721>
- Schröder, J. M., Ávila Rodríguez, L. P., & Günter, S. (2021). Research trends: Tropical dry forests: The neglected research agenda? *Forest Policy and Economics*, 122, 102333. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102333>
- Schulz, K., Guschal, M., Kowarik, I., Almeida-Cortez, J. S. de, Sampaio, E. V. de S. B., & Cierjacks, A. (2019). Grazing reduces plant species diversity of Caatinga dry forests in northeastern Brazil. *Applied Vegetation Science*, 22(2), 348–359. <https://doi.org/10.1111/avsc.12434>
- Shen, Z., Yong, B., Gourley, J. J., Qi, W., Lu, D., Liu, J., Ren, L., Hong, Y., & Zhang, J. (2020). Recent global performance of the Climate Hazards group Infrared Precipitation (CHIRP) with Stations (CHIRPS). *Journal of Hydrology*, 591, 125284. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125284>
- Silva, A. M., Silva, R. M. da, & Santos, C. A. G. (2019). Automated surface energy balance algorithm for land (ASEBAL) based on automating endmember pixel selection for evapotranspiration calculation in MODIS orbital images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.02.012>

- Silva, A. S., Silva, E. M., Leal Junior, J. B. V., Sales, D. C., Moura, I. J. M., & Alves, J. M. B. (2021). Distúrbios ondulatórios de leste no Nordeste Brasileiro: Um estudo de caso utilizando modelagem numérica de mesoescala. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36(3 Suppl), 637–649. <https://doi.org/10.1590/0102-77863630033>
- Silva, B. K. N., Amorim, A. C. B., Silva, C. M. S., Lucio, P. S., & Barbosa, L. M. (2019). Rainfall-related natural disasters in the Northeast of Brazil as a response to ocean-atmosphere interaction. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(3–4), 1821–1829. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02930-9>
- Silva, B. L. R., Tavares, F. M., Sampaio, E. V. S. B., Souza, J. R. B., Althoff, T. D., & Almeida, J. S. (2024a). Structure of herbaceous communities in areas with different natural regeneration periods in the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(6), 4372–4386. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.6.p4372-4386>
- Silva, C. M. S., Bezerra, B. G., Mendes, K. R., Mutti, P. R., Rodrigues, D. T., Costa, G. B., Oliveira, P. E. S. de, Reis, J., Marques, T. V., Ferreira, R. R., Campos, S., Ramos, T. M., Vieira, M. M. L., Oliveira, A. C. C. F. de, Câmara da Silva, C. L., Silva, A. C., Antonino, A. C. D., & Menezes, R. S. C. (2024d). Rainfall and rain pulse role on energy, water vapor and CO₂ exchanges in a tropical semiarid environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 345. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109829>
- Silva, D. F., Rodrigues, J. L. M., Erikson, C., Silva, A. M. M., Huang, L., Araujo, V. L. V. P., Matteoli, F. P., Mendes, L. W., Araujo, A. S. F., Pereira, A. P. A., Melo, V. M. M., & Cardoso, E. J. B. N. (2024c). Grazing exclusion-induced changes in soil fungal communities in a highly desertified Brazilian dryland. *Microbiological Research*, 285, 127763. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127763>
- Silva, R. R., Menezes, R. S. C., Candeias, A. L. B., Sales, A. T., Barros, A. H. C., Sampaio, E. V. S. B., Santana, I. L., & Lins, T. R. S. (2024b). Mapping of soil carbon balances changes in the dry tropical forest ecosystem in Pernambuco, Brazil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(4), 2449–2459. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.4.p2449-2459>
- Silva Filho, R. da, Vasconcelos, R. S., Galvão, C. D. O., Cunha, J. E. de B. leite, & Rufino, I. A. A. (2020). Representação matemática do comportamento intra-anual do NDVI no Bioma Caatinga. *Ciência Florestal*, 30(2), 473. <https://doi.org/10.5902/1980509837279>
- Silva Neto, E. P., Bezerra, U. A., Oliveira, S. H., & Cunha, J. (2024). Análise de modelos de evapotranspiração por sensoriamento remoto na Caatinga: Uma compreensão de variações temporais e espaciais. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(5), 3663–3681. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.5.p3663-3681>
- Souza, T. A. F., & Freitas, H. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungal community assembly in the Brazilian tropical seasonal dry forest. *Ecological Processes*, 6(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s13717-017-0072-x>
- Tabarelli, M., Rocha, C. F. D. da, Romanowski, H. P., & Rocha, O., & Lacerda, L. D. de. (2013). *PELD-CNPq dez anos do Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração do Brasil: Achados, lições e perspectivas*. Ed. Universitária da UFPE.
- Vieira, L. C. de S., Silva Filho, V. D. P., Dantas, V. D. A., & Prakki Satyamurty, & Sá, A. S. de. (2022). Sazonalidade do sequestro e estoque de carbono na Caatinga, durante as estações seca e chuvosa. *Revista Brasileira de Climatologia*, 31, 539–564. <https://doi.org/10.55761/abclima.v31i18.15583>
- Zhang, Y., & Ye, A. (2021). Would the obtainable gross primary productivity (GPP) products stand up? A critical assessment of 45 global GPP products. *Science of The Total Environment*, 783. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146965>