

ÁLEFE CHAGAS DE LIMA COSTA

FLUXOS DE ENERGIA, ÁGUA E CARBONO EM PLANTIO DE CACTÁCEA E SUAS RELAÇÕES
COM A DINÂMICA DE CRESCIMENTO E SAZONALIDADE DO REGIME HÍDRICO NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Serra Talhada-PE

2025

**C
O
S
T
A**

**L
C
A**

**F
L
U
X
O**

**D
E**

**E
N
E
R
G
I
A
,
Á
G
U
A**

**·
·
·**

**2
0
2
5**

ÁLEFE CHAGAS DE LIMA COSTA

FLUXOS DE ENERGIA, ÁGUA E CARBONO EM PLANTIO DE CACTÁCEA E SUAS RELAÇÕES
COM A DINÂMICA DE CRESCIMENTO E SAZONALIDADE DO REGIME HÍDRICO NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. DSc. Thieres George Freire da Silva.

Coorientador: DSc. Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim

Serra Talhada-PE

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação Sistema
Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário: Israel Lacerda do Nascimento – CRB - 42317

C837f Costa, Álefe Chagas de Lima

Fluxos de energia, água e carbono em plantio de cactácea e suas relações com a dinâmica de crescimento e sazonalidade do regime hídrico no semiárido brasileiro / Álefe Chagas de Lima Costa. – Serra Talhada, 2025.
65 f. il.

Orientador (a): Thieres George Freire da Silva.

Orientador (a): Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica Serra Talhada - UAST, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Serra Talhada, PE-BR, 2024.

Inclui referências.

1. Cultivos agrícolas. 2. Vegetação e clima. 3. Cactos. 4. Palma forrageira. 5. El Niño (Corrente oceânica). I. Silva, Thieres George Freire da, orient. II. Jardim, Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz, coorient. III. Título.

CDD 633

ÁLEFE CHAGAS DE LIMA COSTA

FLUXOS DE ENERGIA, ÁGUA E CARBONO EM PLANTIO DE CACTÁCEA E
SUAS RELAÇÕES COM A DINÂMICA DE CRESCIMENTO E SAZONALIDADE
DO REGIME HÍDRICO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Produção Vegetal da Universidade
Federal Rural de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do título
de Mestre em Produção vegetal.

Aprovado (a) em: 25/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva (Orientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Alan Cezar Bezerra (Examinador Interno)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Antonio José Steidle Neto (Examinador Externo)
Universidade Federal de São João del-Rei

A Deus!

Aos meus pais, Elizângela Gomes de Lima Costa e Francisco das Chagas Costa, pelo amor, carinho, dedicação, incentivo, conselhos, ensinamentos e por sempre estarem presente em minha vida, independente da distância.

A minha esposa Mariana Vasconcelos Batista dos Santos, pelo amor, carinho, paciência, incentivo, conselhos, ensinamentos e por sempre estar presente em minha vida, independente da distância.

Amo vocês!

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada. Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal - PGPV, pelas oportunidades para meu crescimento profissional. A todo o corpo docente do PGPV, pelos ensinamentos, dedicação e contribuições importantes ao longo do mestrado.

A FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco) pelo apoio financeiro por intermédio do Projeto.

Ao professor Thieres George Freire da Silva, por toda a orientação, responsabilidade, dedicação, paciência, ensinamentos e pelas oportunidades dadas, as quais possibilitaram meu crescimento profissional e pessoal.

Aos membros do Grupo de Agrometeorologia no Seminário – GAS, por todos os momentos e ensinamentos compartilhados, pelos trabalhos desenvolvidos, pelas conversas, momentos de descontração, responsabilidade e apoio na instalação e manutenção dos experimentos, sendo fundamentais e indispensáveis para a conclusão desse trabalho. Em especial aos pesquisadores, Carlos André Alves de Souza, Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim e Cleber Pereira Alves. Assim como todos os colegas e amigos que fazem parte do PGPV.

RESUMO GERAL

As regiões semiáridas caracterizam-se por baixos volumes pluviométricos, distribuídos de forma irregular ao longo do ano, associados a elevada demanda atmosférica. Esses fatores favorecem a escassez hídrica que, em conjunto com as ações antrópicas, intensifica os impactos ambientais e compromete a cobertura do solo. Dentre as plantas promissoras, a palma forrageira se destaca pelas suas características adaptativas ao semiárido e pela sua importância na alimentação de ruminantes. A ocorrência do El Niño Oscilação Sul (ENOS) ocasiona alterações nas variáveis climáticas como temperatura e precipitação que podem levar a períodos de seca ou enchentes em regiões semiáridas, portanto é necessário compreender o funcionamento dos fluxos de energia, carbono e água em plantio de palma são dependentes das condições climáticas, assim, nos ciclos de El Niño e La Niña a palma forrageira vai atuar como fonte ou sumidouro de carbono? Diante do exposto, objetivou-se avaliar se a palma se comporta como fonte ou sumidouro de carbono em durante a ocorrência dos fenômenos La Niña e El Niño e a Neutralidade. O estudo foi realizado no município de Floresta, Pernambuco, Brasil, com média anual de chuva de 489 mm, umidade relativa do ar de 61%, temperatura média do ar de 26,1 °C, e demanda atmosférica superior a 2.000 mm ano⁻¹. Os dados foram coletados no período de janeiro de 2022 a dezembro de 2024, em um cultivo de palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], com espaçamento de cultivo de 2,0 x 0,5 m, com um total de densidade de 10.000 plantas ha⁻¹. Realizou-se o fechamento do balanço de energia, a produtividade do uso da água da cultura, análise biométrica, biomassa e rendimento da forragem e os dados passaram por regressão linear e análise de componentes principais para avaliar as relações entre estações e variáveis ambientais do cacto. A partir dos dados obtidos durante o período experimental, foi possível estimar a energia da superfície, o fechamento do balanço energético, o rendimento de forragem da cultura, a eficiência do uso da radiação e a eficiência do uso da água. Deste modo, observou-se que a palma forrageira se comportou como sumidouro de carbono, independente do fenômeno La Niña ou El Niño.

Palavras-chave: Balanço de energia, Palma forrageira, Radiação, El Niño e La Niña.

GENERAL ABSTRACT

Semi-arid regions are characterized by low rainfall with irregular distribution throughout the year, with high atmospheric demand. These factors contribute to water scarcity, which, together with anthropogenic actions, causes environmental impacts that affect soil cover. Forage cactus stands out for its adaptive characteristics to the semiarid region and its importance in feeding ruminants. The occurrence of ENSO (El Niño Southern Oscillation) causes changes in climatic variables such as temperature and precipitation, which can lead to periods of drought or flooding in semiarid regions. Therefore, it is necessary to understand how energy, carbon, and water flows in palm plantations depend on climatic conditions. Thus, during the El Niño and La Niña cycles, will forage cactus act as a carbon source or sink? Given the above, the objective was to evaluate whether cactus acts as a carbon source or sink during the La Niña and El Niño phenomena and the Neutrality. The study was carried out in the municipality of Floresta, Pernambuco, Brazil, with an average annual rainfall of 489 mm, relative humidity of 61%, average air temperature of 26.1 °C, and atmospheric demand greater than 2,000 mm year⁻¹. Data were collected from January 2022 to December 2024, in a forage cactus [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.] crop, with a crop spacing of 2.0 x 0.5 m, and a total density of 10,000 plants ha⁻¹. The energy balance, water use productivity in the crop, biometric analysis, biomass and forage yield were performed, and the data underwent linear regression and principal component analysis to assess the relationships between seasons and environmental variables of the cactus. From the data obtained during the experimental period, it was possible to estimate surface energy, energy balance closure, crop forage yield, radiation use efficiency, and water use efficiency. Thus, it was observed that forage cactus acted as a carbon sink, independent of the La Niña or El Niño phenomena.

Keywords: Energy balance, Forage palm, Radiation, El Niño and La Niña.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 – RESILIÊNCIA AMBIENTAL NO SEMIÁRIDO, INFLUÊNCIA DO ENSO NO BALANÇO DE ENERGIA, FLUXO DE CARBONO E IMPORTÂNCIA DA PALMA FORRAGEIRA: UMA REVISÃO

Figura 1. Etapas de busca e seleção utilizadas para a obtenção dos estudos. 19

CAPÍTULO 1 – RESILIÊNCIA AMBIENTAL NO SEMIÁRIDO, INFLUÊNCIA DO ENSO NO BALANÇO DE ENERGIA, FLUXO DE CARBONO E IMPORTÂNCIA DA PALMA FORRAGEIRA: UMA REVISÃO

Figura 1. Localização geográfica da área de estudo do município de Floresta, Pernambuco, (a–b). Visão geral do campo experimental, com localização da torre micrometeorológica no local cultivado (c). de *Opuntia stricta* (Haw.) Haw. (d). 39

Figura 2. Desenho esquemático da área experimental, (a). Visão da torre micrometeorológica na área experimental (b). Visão da área experimental, (c). 41

Figura 3. Condições ambientais mensais durante o período de estudo, para os períodos de La Niña (LN), El Niño (EN), Neutro (N) em (2022–2024) no cultivo de cactos na região semiárida brasileira. Os gráficos mostram as condições locais de (a) PARa - radiação fotossinteticamente ativa — PARa ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), (b) radiação fotossinteticamente ativa medida abaixo do dossel — PARb ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), (c) radiação solar global — Rg ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), (d) Umidade do solo — US ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), (e) Precipitação — R-DEFA (mm), (f) déficit de pressão de vapor — VPD (kPa), (g) velocidade do vento — Ws (ms^{-1}) (h) temperatura do ar — T ($^{\circ}\text{C}$), (i) umidade relativa — UR (%), As retas pontilhadas indicam os limites dos anos. 46

Figura 4. Ciclo diurno de troca de carbono, balanço de energia e radiação horária durante os períodos de La Niña (LN) El Niño (EN) e Neutro (N) (a) Troca líquida de CO₂ do ecossistema — NEE, (b) respiração do ecossistema — Reco, (c) produtividade primária bruta — GPP, (d) radiação fotossintética ativa — PAR, são expressas em $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. (e) radiação solar global — Rg, radiação de onda curta ascendente — Rr, (g) radiação de onda longa ascendente — Rs, (h) radiação de onda longa descendente — Ra, (i) Radiação líquida — Rn, (j) fluxo de calor latente — LE, (k) fluxo de calor sensível — H, (l) fluxo de calor do solo — G, todas expressas em W m^{-2} . Valores negativos no painel (a) indicam absorção de carbono, enquanto valores positivos nos painéis (b) e (c) indicam liberação de carbono pelo ecossistema. 48

Figura 5. Variação temporal do balanço de radiação no cultivo do cacto *Opuntia* na região semiárida brasileira. (a) radiação solar global — Rg, (b) radiação de onda curta ascendente — Rr, (c) radiação de onda longa ascendente — Rs, (d) radiação de onda longa descendente — Ra. Todas as variáveis foram medidas em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. As retas pontilhadas indicam os limites dos anos. 49

Figura 6. Variação sazonal da (a) radiação líquida — Rn, (b) fluxo de calor latente — LE, (c) fluxo de calor sensível — H, e (d) fluxo de calor no solo — G durante o período de 2021 a 2024 no cultivo de cacto *Opuntia stricta* na região do Semiárido brasileira. Todas as variáveis foram medidas em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. As retas pontilhadas indicam os limites dos anos. 50

Figura 7. Variação mensal do balanço de carbono para (a) troca líquida de CO₂ no ecossistema — NEE, (b) produtividade primária bruta — GPP, (c) respiração do

ecossistema — R_{eco}), (d) radiação fotossinteticamente ativa absorvida (PARa) no cultivo de cacto *Opuntia* durante 2022–2024 na região semiárida brasileira. As retas pontilhadas indicam os limites dos anos. Nota: NEE, GPP, R_{eco} em $g\ C\ m^{-2}\ dia^{-1}$ e PARa em $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$51

Figura 8. Relações entre energia disponível ($R_n - G$) e fluxos turbulentos ($LE + H$) para medições de meia hora de 2022 a 2024 no cultivo de cactos na região semiárida brasileira. A linha tracejada cinza é a linha 1:1, e a linha preta é a linha ajustada determinada por regressão linear.52

Figura 9. Taxa de acúmulo de matéria seca da *O. stricta*, durante os anos de 2022, 2023 e 2024.54

Figura 10. A análise de componentes principais (ACP) mostra a relação entre as variáveis ambientais e as da planta de cacto.55

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 – RESILIÊNCIA AMBIENTAL NO SEMIÁRIDO, INFLUÊNCIA DO ENSO NO BALANÇO DE ENERGIA, FLUXO DE CARBONO E IMPORTÂNCIA DA PALMA FORRAGEIRA: UMA REVISÃO.

Tabela 1. Ocorrência de La Niña, Neutralidade (período de transição) e El Niño, no período de 2010 a 2024, Índice Oceânico Niño (ONI), (NOAA Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos EUA, 2024).21

CAPÍTULO 2 – BALANÇO DE ENERGIA, ÁGUA E SEQUESTRO DE CARBONO EM CACTÁCEA EM PERÍODOS DE EL NIÑO E LA NIÑA NO SEMIÁRIDO.

Tabela 2. Ocorrência de La Niña, Neutralidade (período de transição) e El Niño, no período de janeiro de 2022 a dezembro de 2024, Índice Oceânico Niño (ONI), (NOAA Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos EUA, 2024).40

Tabela 3. Valores acumulados e médios das variáveis, durante os períodos de ENSO e os dias de duração.46

Tabela 4. Partições de radiação, energia e radiação fotossintética ativa (RAP) durante os anos (2022–2024) no cultivo de *Opuntia* na região semiárida brasileira.....53

Tabela 5. Biomassa, índice morfofisiológico e taxa de crescimento e eficiência de água no cultivo de cactos no Semiárido brasileiro.53

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – RESILIÊNCIA AMBIENTAL NO SEMIÁRIDO, INFLUÊNCIA DO ENSO NO BALANÇO DE ENERGIA, FLUXO DE CARBONO E IMPORTÂNCIA DA PALMA FORRAGEIRA: UMA REVISÃO 15

1.Introdução 17

2.Metodologia 18

3. Revisão de literatura 19

3.1. Caracterização ambiental do semiárido 19

3.2. El Niño e La Niña: influência em ambientes semiáridos 21

3.3. Trocas de carbono e balanço de energia nos ecossistemas 22

3.4. Palma forrageira e sua importância para o semiárido 24

4. Considerações finais 26

5. Referências 26

CAPÍTULO 2 – IMPACTO DO CICLO EL NIÑO/LA NIÑA NO BALANÇO DE ENERGIA, CARBONO E ÁGUA EM CULTIVO DE CACTO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO.35

1.Introdução37

2.Materiais e métodos39

2.1. Descrição da área de estudos 39

2.2. Procedimentos de condução experimental40

2.3. Medidas micrometeorológicas e instrumentalização41

2.4. Estimativa de energia de superfície42

2.5. Particionamento do orçamento de energia42

2.6. Fechamento do balanço energético43

2.7. Análise biométrica, biomassa e rendimento de forragem 44

2.8. Eficiência do uso da água44

2.9. Tratamentos dos dados e análise estatística45

3. Resultados45

3.1. Condições ambientais durante o período experimental45

3.2. Variação sazonal e temporal no balanço de carbono, energia e radiação47

3.3. Fechamento do balanço energético51

3.4. Respostas de rendimento biomassa e eficiência do uso da água53

3.5. Análise de componentes principais54

4. Discussão 55

4.1. Condições ambientais e fechamento do balanço energético	55
4.2. Comportamento do balanço de energia e carbono nos períodos de La Niña e El Niña e Neutro.	56
4.3. Rendimento biomassa e eficiência do uso da água	57
5. Conclusão	58
6. Referências	59

CAPÍTULO 1 – RESILIÊNCIA AMBIENTAL NO SEMIÁRIDO, INFLUÊNCIA DO ENSO NO BALANÇO DE ENERGIA, FLUXO DE CARBONO E IMPORTÂNCIA DA PALMA FORRAGEIRA: UMA REVISÃO

RESUMO: O semiárido brasileiro tem como características condições climáticas com precipitação pluviométrica irregular em menor quantidade, sendo assim, um dos fatores que influenciam nas ações antrópicas ambientais, interferindo em uma menor cobertura vegetal no solo. Neste cenário, a palma forrageira se apresenta como uma cultura bem adaptada às condições do semiárido e com destaque na alimentação animal. Dito isso vale ressaltar que a ocorrência dos fenômenos do ENSO (El Niño Oscilação Sul) promove mudanças na atmosfera que impactam na temperatura do Oceano Pacífico, onde, o El Niño pode contribuir ainda mais na redução de chuvas, ocasionando a escassez hídrica, como a ocorrência do La Niña pode levar a eventos de enchentes. Diante do exposto objetivou-se compreender sobre a importância da palma forrageira para o semiárido, fundamentando sobre as características do semiárido quando há ocorrência do El Niño e La Niña, investigando o comportamento dos fluxos de carbono e energia em cultivo de palma forrageira. Os estudos relatam que o semiárido brasileiro é uma das regiões mais afetadas pelas mudanças climáticas, a radiação solar e terrestre são fundamentais nos processos físicos e biológicos no sistema solo-planta-atmosfera, um dos meios para avaliação das condições do ecossistema é compreender o comportamento dos fluxos de carbono e energia, ressaltam-se que o Metabolismo Ácido das Crassuláceas (CAM) é um fator que torna a palma adaptada ao semiárido e que por meio da sua eficiência contribui no processo de mitigação das mudanças climáticas. Deste modo, a compreensão das características da palma forrageira, juntamente com a identificação do seu comportamento durante a ocorrência dos fenômenos ENSO, é fundamental para a redução dos impactos ambientais reduzindo os riscos climáticos.

Palavras-chave: Antrópicas, Ecossistema, Mudanças climáticas, Sazonalidade.

CHAPTER 1 – ENVIRONMENTAL RESILIENCE IN THE SEMI-ARID REGION, INFLUENCE OF ENSO ON ENERGY BALANCE, CARBON FLUX AND IMPORTANCE OF FORAGE PALM: A REVIEW

ABSTRACT: The Brazilian semiarid region is characterized by irregular rainfall and less rainfall, which is one of the factors that influences environmental anthropogenic actions, resulting in reduced soil vegetation cover. In this scenario, forage cactus is a crop well adapted to semiarid conditions and plays a prominent role in animal feed. It is worth noting that the occurrence of ENSO (El Niño Southern Oscillation) phenomena promotes atmospheric changes that impact the temperature of the Pacific Ocean. El Niño can further reduce rainfall, causing water scarcity, just as La Niña can lead to flooding. Given the above, the objective was to understand the importance of forage cactus for the semiarid region, based on the characteristics of the semiarid region during El Niño and La Niña events, and to investigate the behavior of carbon and energy fluxes in forage cactus cultivation. Studies report that the Brazilian semiarid region is one of the regions most affected by climate change. Solar and terrestrial radiation are fundamental to the physical and biological processes of the soil-plant-atmosphere system. One way to assess ecosystem conditions is by understanding the behavior of carbon and energy flows. It is noteworthy that Crassulacean Acid Metabolism (CAM) is a factor that makes palm oil adapted to the semiarid region and that, through its efficiency, it contributes to the process of mitigating climate change. Therefore, understanding the characteristics of forage palm oil, along with identifying its behavior during ENSO events, is essential for reducing environmental impacts and mitigating climate risks.

Keywords: Anthropics, Ecosystem, Climate change, Seasonality.

1. Introdução

As regiões semiáridas brasileiras caracterizam por variabilidade interanual da precipitação, baixos acumulados anual, alta taxas de evaporação e má distribuição da chuva ao longo do ano. Esta condição torna esses ambientes mais frágeis e, diante dos impactos das ações antrópicas, pode promover a desertificação dos ambientes, o que promove impactos na econômicos, ambientais e sociais (Bezerra et al., 2020; Calvin et al., 2023; Hussain et al., 2018; Marengo Orsini et al., 2017; Pereira et al., 2015).

O nordeste brasileiro tem sido afetado por essa variabilidade interanual da precipitação provocada pelos fenômenos El Niño e La Niña, que proporcionam mudanças nos movimentos atmosféricos afetando a temperatura do Oceano Pacífico, causando irregularidades nos padrões de precipitação (de la Casa et al., 2021; Gelcer et al., 2013; Rodrigues et al., 2017). Essas anomalias na temperatura da superfície do mar também alteram as condições climáticas nas regiões da América central e Norte, Europa, Norte do Brasil e África central (Wu et al., 2020). Entretanto, é preciso ressaltar que, existem outros padrões climáticos que influenciam na variação da ocorrência e intensidade das chuvas, sendo estes, a Oscilação Decadal do Pacífico (PDO), a Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO), a Oscilação Madden-Juliana (MJO), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Frentes Frias, Linhas de Instabilidade e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) (Ferreira & Mello, 2005; T. G. F. da Silva et al., 2025).

Os impactos causados devido a ocorrência desses eventos atmosféricos geram impactos nas atividades agrícolas, como nas culturas milho e soja (de la Casa et al., 2021; Nóia Júnior & Sentelhas, 2019), trigo (Ramirez-Rodrigues et al., 2014) (Ramirez-Rodrigues et al., 2014), tomate (Gelcer et al., 2018). Neste cenário, setor agropecuário do semiárido brasileiro também é afetado pelos eventos de seca que prejudicam a produtividade deste setor, requerendo a adoção de culturas adaptadas às mudanças climáticas, que sejam usadas na alimentação dos animais e que possam contribuir para a redução dos impactos ambientais, através do balanço de carbono e energia.

A palma forrageira é uma cactácea que apresenta como características morfofisiológicas apropriadas para o seu uso no semiárido, como a presença do Metabolismo Ácido das Crassuláceas (CAM) (Jardim et al., 2023; Santos et al., 2021), além da importância do seu uso na alimentação de ruminantes em épocas de escassez de água, visto a baixa disponibilidade de forragem (Alves et al., 2023). Portanto, fatores que degradam o meio ambiente, como o desmatamento e as queimadas, podem levar o semiárido brasileiro a um processo de desertificação, o que contribui para as mudanças

climáticas elevando em até 1°C a média da temperatura global e em 1,5°C a média no Brasil (Cintra et al., 2020; Jardim, et al., 2023; Santos et al., 2024).

Diante da necessidade de atender a demanda de forragens na alimentação animal conjuntamente com a redução nos efeitos na mudança do uso do solo, avaliar o comportamento das trocas de energia e carbono, dentro do sistema solo-planta-atmosfera em áreas cultivadas com a palma forrageira utilizando os métodos de monitoramento desses fluxos (Jardim, et al., 2023; Jardim, et al., 2023; Santos et al., 2024)

Portanto, devido à escassez de estudos de revisão na literatura, a pesquisa traz informações importantes e pertinentes acerca dos temas de balanço de energia, carbono e água em cactáceas. Nesse sentido, objetivou-se fundamentar sobre as características do semiárido, influência dos fenômenos El Niño e La Niña, relatar a importância da palma forrageira, e investigar o comportamento desses fluxos em cactáceas, visando compreender como a palma forrageira pode contribuir nesse sistema, sendo consultados diversos artigos de forma online com base no seu tema e relevância.

2. Metodologia

Neste capítulo de revisão foi utilizado um conjunto de artigos científicos publicados entre os anos de 2010 e 2025. Utilizando como critério de seleção combinações de palavras-chaves: “regiões semiáridas” e “áridas”, “cactáceas”, (“balanço de energia” ou “fluxo de energia”), “sumidouro de carbono”, “palma forrageira”, (“El Niño” ou “La Niña”), “fluxos de carbono”, “ecossistema terrestre”, “Opuntia”, “Eddy Covariance”, “cobertura do solo” e “evapotranspiração”, juntamente com os operadores booleanos AND e OR, sendo utilizado os seguintes bancos de dados, Scopus, Google Scholar e ScienceDirect. Após a triagem dos títulos e resumos, 49 artigos foram excluídos. Dos 63 artigos restantes, 16 foram removidos por não corresponder a proposta do tema, ao final, 47 artigos foram incluídos nesta revisão sistemática e análise (Figura 1).

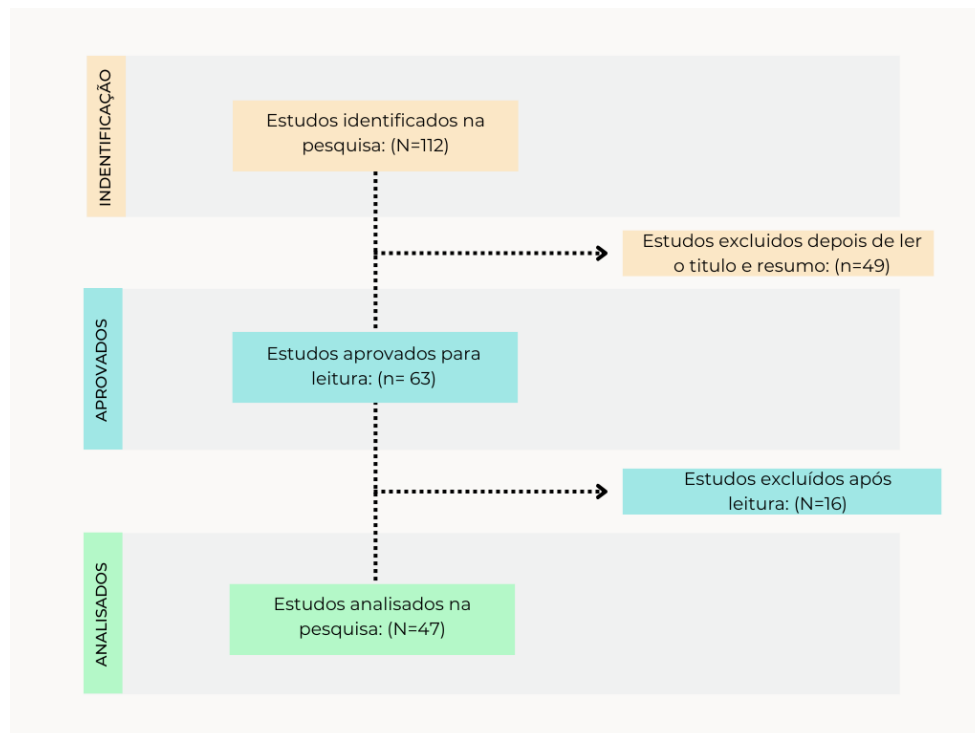


Figura 1. Fluxograma de etapas de busca e seleção utilizadas para a obtenção dos estudos.

Fonte: Autor

3. Revisão de literatura

3.1. Caracterização ambiental do semiárido

O território mundial é composto por áreas com 55% de zonas áridas e semiáridas e desérticas, no entanto, há uma tendência de aumento desse percentual, por meio das alterações climáticas. Naturalmente, a precipitação nas regiões semiáridas acontece de forma regular em nível abaixo da normal climatológica, com a existência de secas longas, gerando uma maior escassez hídrica. Com as projeções de mudanças climáticas que indicam uma redução da precipitação, espera-se um agravamento da sazonalidade, déficit hídrico e causando a degradação ambiental nessas zonas, tornando essas áreas mais susceptíveis à desertificação (Cruz Neto et al., 2017; Alves et al., 2021). Escassez hídrica, portanto, afetando o desenvolvimento socioeconômico e ambiental (Alves et al., 2021). No Brasil, a região semiárida ocupa um espaço territorial de 1.127.953 km², sendo composta pelos estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe, incluindo o Norte de Minas Gerais, integrada por 1.262 municípios, com uma população de aproximadamente 28 milhões de habitantes (Silva et al., 2020).

A região do Nordeste brasileiro tem a ocorrência de variabilidades nas condições meteorológicas, sendo constituída de três tipos de clima, conforme classificação de Koppen, sendo estes: BShw- semiárido, com chuvas acumuladas nos meses de dezembro e janeiro; BSw- semiárido, período chuvoso no verão e outono, com maiores ocorrências em março e abril; e BShs' – semiárido, com chuvas no outono e inverno ocorrendo nos meses de maio e junho (Nunes Alves et al., 2018). A predominância é tipo semiárido, que se caracteriza pela alta demanda atmosférica, baixo nível de precipitação pluviométrica, má distribuição ao longo do ano causando, assim, favorecendo ocorrência de escassez hídrica (Hussain et al., 2018; Pereira et al., 2015). No relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) 2023 apresenta que o Semiárido brasileiro como uma das regiões mais vulneráveis aos efeitos das alterações climáticas, ocasionando um aumento da aridez devido às circunstâncias dos eventos extremos como as secas, em maior constância e intensidade, e redução dos recursos hídricos (Calvin et al., 2023).

Na região Nordeste o clima é influenciado por fenômenos atmosféricos, como o El Niño, provocando menores precipitação pluviométrica, devido ao aquecimento do Oceano Atlântico, no caso do La Niña provoca aumento da precipitação causada pelo resfriamento do Oceano Atlântico (Santos & Nóbrega, 2023; Silva et al., 2020). Outros sistemas atmosféricos que contribuem na precipitação pluviométrica são a ZCTI principal responsável pelas chuvas no Nordeste brasileiro, variando conforme a temperatura do Atlântico Tropical, deslocando-se mais ao sul em anos úmidos, a VCAN atuam no verão em altos níveis da atmosfera, podendo favorecer chuvas intensas no sertão quando bem posicionados ou inibir a precipitação quando desfavoráveis, as Frentes Frias avançam do Sul, atingindo mais o litoral leste ou sul da Bahia, elevando a nebulosidade e as chuvas e as Linhas de Instabilidade são sistemas convectivos que se formam no encontro de massas de ar, ocasionando chuvas intensas no interior do Nordeste (Ferreira & Mello, 2005).

No semiárido é possível observar atributos naturais como presença de solos rasos e pedregosos, cursos de águas temporários, baixa recarga subterrânea, elevado escoamento superficial, sendo a vegetação nativa caducifólia com presença de cactáceas próprias da Caatinga (Lucena et al., 2021). Devido às características presentes no semiárido brasileiro, os principais recursos econômicos são realizados por meio das criações de ruminantes, com destaque para a caprinovinocultura, que são animais de rusticidade, desta forma adaptados às condições do ambiente que consomem as forragens

disponíveis gerando produtos (leite e carne) para a comercialização dos produtores (Santos et al., 2023)

A região semiárida do nordeste brasileiro é mais exposta às situações de seca, que devido a variação pluviométrica, solo degradado e o estado de desertificação proporcionam que esta região seja mais suscetível às mudanças climáticas, ressaltando que a redução ou o aumento da precipitação nesta região estão ligados a ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña (Marengo Orsini et al., 2017).

3.2. El Niño e La Niña: influência em ambientes semiáridos

O ENSO é um fenômeno ligado ao oceano-atmosfera, composto por três fases, El Niño (fase quente), La Niña (fase fria), e neutra quando não há ocorrência das outras fases. No El Niño ocorre um aumento atípico da temperatura da superfície do mar e da pressão atmosférica no Oceano Pacífico, já o La Niña é o oposto, ou seja, ocorre a diminuição da temperatura da superfície do mar e redução da pressão atmosférica no Oceano Pacífico. Nessas fases os ventos alísios se consolidam o que gera uma mudança no vento e afeta a temperatura do oceano, interferindo na precipitação ocasionados pela troca de calor entre as águas e a atmosfera (Gelcer et al., 2013).

O fenômeno do El Niño Oscilação Sul (ENOS) causa efeitos na dinâmica dos oceanos, deste modo, gera mudanças na circulação atmosférica e influencia as intensidades e frequências dos sistemas meteorológicos, em escalas regionais e global, assim como em escalas sazonais e anuais com grande impacto na precipitação (Correia Filho et al., 2019; Santiago et al., 2022). Esse tipo de alteração promove uma redução no volume de chuva e, por consequência, ocasiona a um longo período de seca, principalmente no semiárido brasileiro (Correia Filho et al., 2019; Santiago et al., 2022).

Na Tabela 1 pode-se observar a ocorrência dos fenômenos ENOS durante o período de 2010 a 2024. Os eventos El Niño e La Niña são fundamentais nas mudanças da distribuição temporal da chuva, a depender da intensidade desses eventos pode proporcionar secas ou enchentes violentas, ocasionando efeitos na produção agrícola das regiões Norte e Nordeste afetando a economia (Rodrigues et al., 2017).

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2010	EN	EN	EN	NE	NE	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN
2011	LN	LN	LN	LN	LN	NE	LN	LN	LN	LN	LN	LN
2012	LN	LN	LN	LN	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE

2013	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
2014	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	EN	EN	EN
2015	EN	EN	EN	EM	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
2016	EN	EN	EN	EM	NE	NE	NE	LN	LN	LN	LN	LN
2017	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	LN	LN	LN
2018	LN	LN	LN	LN	NE	NE	NE	NE	EN	EN	EN	EN
2019	EN	EN	EN	EM	EN	EN	NE	NE	NE	NE	NE	NE
2020	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	LN	LN	LN	LN	LN
2021	LN	LN	LN	LN	LN	NE	NE	LN	LN	LN	LN	LN
2022	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN
2023	LN	NE	NE	NE	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
2024	EN	EN	EN	EM	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE

Tabela 1. Ocorrência de La Niña, Neutralidade (período de transição) e El Niño, no período de 2010 a 2024, Índice Oceânico Niño (ONI), (NOAA Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos EUA, 2024). LN- La Niña; NE- Neutro; EN- El Niño.

A Tabela se baseia na anomalia da temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico em relação à normal (SSTA), na região Niño 3.4, desse modo, classificando a ocorrência dos fenômenos, La Niña quando a SSTA é inferior ou igual a $-0,5^{\circ}\text{C}$ por cinco médias consecutivas durante três meses, o mesmo sentido é para classificar o El Niño, porém, é classificado quando o SSTA é superior ou igual a $+0,5^{\circ}\text{C}$ por cinco médias consecutivas durante três meses. Já para a fase de neutralidade é classificado quando SSTA está entre $-0,5$ e $+0,5^{\circ}\text{C}$.

A ocorrência do ENOS proporciona mudança climática devido a influência da atmosfera com o oceano, deste modo gerando efeito no setor agrícola em diferentes localidades como, América do Sul, Estados Unidos, África, Europa e Ásia. Dessa forma, cresce a demanda por informações para que possa diminuir os riscos nas produções agrícolas que estes fenômenos promovem (de la Casa et al., 2021).

O Nordeste do Brasil contempla uma expressiva fração da região semiárida, cuja sua característica é definida por uma elevada variação temporal e espacial do volume de chuvas, elevadas temperaturas do ar e ocorrência de secas. Nesta região, a seca é proveniente de diferentes fenômenos, em especial o El Niño, que bloqueia a atividade convectiva ligada a parte descendente da circulação anômala de Walker, resultando na redução nos eventos de chuva (Medeiros & Oliveira, 2021).

O comportamento das mudanças climáticas compõe outros fatores, que influenciam na dinâmica das precipitações. Por exemplo, o ENOS na fase quente (El

Niño) promove uma redução significativa na precipitação, desta forma há o surgimento de secas severas. Por outro lado, na fase fria do ENOS (La Niña) o efeito é contrário, ocorrendo aumento no volume de precipitação no Norte e Nordeste do Brasil. Na região Sul do Brasil esse fenômeno causa seca, gerando impacto negativo no setor agrícola (Correia Filho et al., 2019).

Na região semiárida ocorre interferências na produtividade da vegetação por fatores como precipitação e temperatura em latitudes médias, sendo estas irregularidades correlacionadas pela disponibilidade de água que são controladas pelos efeitos da temperatura e precipitação que são estimulados pelos fenômenos de El Niño (quentes) e La Niña (frios) (A. Zhang et al., 2017).

3.3. Trocas de carbono e balanço de energia nos ecossistemas

Em virtude do aumento no consumo de alimentos, elevou-se a transformação de ecossistemas florestais em sistemas agrícolas em todo o mundo, desta forma colaborando com a perda de estoques de carbono (C) na vegetação e no solo. As florestas são sistemas que favorecem o carbono orgânico total (COT) do solo por meio da sua diversidade e as interações que ocorrem, como a presença de serrapilheira (León-González et al., 2018). Detectar fontes e sumidouros de carbono terrestre é essencial para o entendimento do sistema terrestre, como também compreender as mudanças climáticas e a mitigação das emissões de gases do efeito estufa.

Atualmente, análises temporais indicam que ecossistemas semiáridos funcionam como sumidouros de carbono terrestre, influenciando a variabilidade interanual. Esse processo ocasiona um desequilíbrio entre dois dos principais fluxos biogênicos que compõem a troca líquida do ecossistema (NEE): a absorção fotossintética de CO₂ (produção primária bruta, GPP) e a liberação respiratória de CO₂ (respiração total do ecossistema, Reco) (Scott et al., 2015; L. Zhang et al., 2020). Existem diversos instrumentos e técnicas para estimar os fluxos de carbono e água, com destaque para o método de Eddy Covariance, que mede o NEE do ecossistema em curtos intervalos de tempo, e para as técnicas de sensoriamento remoto (Guevara-Escobar et al., 2021).

A técnica de Eddy Covariance (EC) é amplamente utilizada para a medição de fluxos turbulentos, sendo aplicada na observação e no estudo das trocas de carbono e água entre a atmosfera e a biosfera. Uma forma de determinar os fluxos de carbono em áreas com vegetação é por meio da GPP, componente essencial do ciclo global do carbono,

resultante da fotossíntese e diretamente relacionada à quantidade de carbono absorvido pela vegetação (Oliveira et al., 2022).

A variação interanual na assimilação de CO₂ por meio dos sumidouros terrestres de carbono está interligada às variáveis meteorológicas como precipitação, temperatura, entre outros. Estudos mostraram que o bioma Caatinga é um grande sumidouro de carbono, mesmo em períodos de estiagem (Mendes et al., 2020, 2021; Santos e Silva et al., 2024; Silva et al., 2021). Silva et al (2021) destacam em seu estudo que a maior parte da dinâmica do CO₂ estimulada foi devido às condições meteorológicas locais. Mendes et al (2025) relatam que a Caatinga atuou como sumidouro de CO₂ com alta eficiência no uso do carbono, ressaltando que as mudanças na cobertura do solo e o vigor da vegetação afetam de forma direta na Troca líquida de CO₂ (NEE), Produtividade Primária Bruta, (GPP) e na Respiração do Ecossistema (Reco), interferindo nos orçamentos de carbonos regionais e globais.

A determinação e validação do NEE dos ecossistemas terrestres são fundamentais na quantificação da função sumidouro e fonte regional de carbono. Portanto as medições de Eddy Covariance (EC) têm gerado informações sobre uma grande quantidade de biomas e tipos de clima, com base nas séries temporais fornecidas sobre os fluxos de energia, fluxos de carbono e condições atmosféricas (Zhang et al., 2023).

A radiação solar e terrestre são as principais fontes de energia para os processos físicos e biológicos no sistema solo-planta-atmosfera, onde a dinâmica de calor, umidade e trocas de radiação entre essas interfaces são essenciais para o clima global. A investigação sobre ecossistemas terrestres é relevante para compreender a quantidade de energia disponível no sistema e está diretamente relacionada com a componente do albedo superficial com um papel vital no microclima local (Borges et al., 2020)

A energia disponível encontrada no ambiente pode ser observada por meio das medições de balanço de energia, através dos métodos micrometeorológicos como, por exemplo, covariância de redemoinhos ou balanço de razão de Bowen, que se trata de uma forma fácil onde é fragmentada em partes sendo estas, calor latente (LE), fluxos de calor sensível (H), e de calor do solo (G) (Souza et al., 2023).

Um dos meios para a avaliação das respostas dos ecossistemas às condições ambientais é através do balanço de energia, expressado de acordo com as suas partições (LE, H e G) (Souza et al., 2015). Várias técnicas podem ser utilizadas para a medição dos fluxos de energia e ET, como a técnica de Eddy Covariance, radiação líquida superficial,

temperatura, índice de vegetação, umidade do solo, balanço hídrico ou modelos de crescimento de culturas (Santos et al., 2020).

As magnitudes de RN, LE, H e G sofrem mudanças conforme o uso da terra e as alterações na água disponível no solo (Souza et al., 2023). Para quantificar os fluxos terra-atmosfera e compreender esta partição, o balanço de energia superficial (SEB) prevê variações nos fluxos turbulentos e na evapotranspiração (ET) da interação do sistema solo-vegetação-atmosfera. Os fluxos de LE, H e G, que são partições da radiação solar líquida (Rn), são elementos do balanço energético e resultam da interação da energia com superfícies que alteram a ET local (Jardim, et al., 2023).

3.4. Palma forrageira e sua importância para o semiárido

O semiárido brasileiro é composto por características climáticas marcantes, como má distribuição de chuvas durante o ano, com níveis inferiores a 800 mm, elevada temperatura do ar com média de 26°C e baixa umidade relativa do ar com média inferior a 50% (Queiroz et al., 2020; Silva et al., 2017). A junção desses fatores leva a baixa disponibilidade de água para a produção agrícola, nesse modo, tornando-se um problema limitante para a produção (Alves et al., 2020; Silva et al., 2021). As limitações ambientais do semiárido brasileiro têm gerado um expressivo uso da palma forrageira e crescimento das áreas de cultivo. Isso é proporcionado devido a rusticidade desta planta para essa região que é capaz de melhorar a atividade agropecuária, tornando-a mais sustentável (Matos et al., 2021).

A palma forrageira apresenta o Metabolismo Ácido das Crassuláceas (CAM) e características morfofisiológicas, como folhas modificadas em espinhos, parênquima aquífero, baixa densidade osmótica, cutículas espessas, grandes vacúolos, e raízes suculentas em forma de cladódio e caule, que contribuem para uma boa adequação em ambientes com elevadas temperaturas do ar e déficit hídrico. Além disso, tais características favorecem à maior eficiência no uso de água e alta produção de biomassa em períodos de seca (Jardim et al., 2023; Santos et al., 2021) (Jardim, et al., 2023; Santos et al., 2021). A palma forrageira desenvolveu modificações fenológicas, fisiológicas e mecânicas para serem resistentes em ambientes semiáridos, assim, com seu Metabolismo Ácido Crassuláceo proporciona à abertura dos seus estômatos e absorção de CO₂ durante o período noturno, onde as temperaturas são menores e a umidade maior que o período diurno (Hassan et al., 2019).

Considerando o potencial de crescimento e a elevada eficiência no aproveitamento da água da palma forrageira em regiões áridas, essa cultura apresenta eficiência para contribuir na mitigação das mudanças climáticas, através do armazenamento de carbono orgânico no solo (Coelho et al., 2023; Jardim, et al., 2023). Por exemplo, a palma forrageira contribuiu para o aumento de carbono orgânico total, em comparação com áreas cultivadas com monocultura de milho. Desta forma, a palma forrageira mostra ser um excelente sumidouro de carbono, apresentando elevada eficiência no aproveitamento da água em razão do seu mecanismo de fixação de CO₂ (León-González et al., 2018).

A composição química dos cactos se caracteriza por uma menor concentração de matéria seca de 5 a 15% MS, FDA (Fibra em detergente ácido), FDN (Fibra em detergente neutro), proteína bruta, com melhor digestibilidade que outras culturas presentes em regiões quentes (Dubeux et al., 2021).

Na literatura encontrou-se resultados de produtividade onde a palma forrageira clone Orelha de Elefante Mexicana (OEM) demonstrou valores médios de 182,51 Mg ha⁻¹ para a matéria fresca e para a matéria seca o valor de 19,26 Mg ha⁻¹, com teor de massa seca de 0,10 (Araújo Júnior et al., 2024). Alves et al. (2025) apresentou a taxa de crescimento absoluto onde a OEM obteve um valor de taxa máxima igual a 0,027 Mg ha⁻¹ °Cdia⁻¹ a 620 °Cdia (155 dias) com o valor médio 0,024 Mg ha⁻¹ °Cdia⁻¹.

O uso de adubo orgânico com até 45Mg/ha eleva a eficiência do uso da água e a produtividade em palma forrageira cultivada no semiárido, com a aplicação correta de nitrogênio (N) em cultivo de palma pode beneficiar com o aumento de matéria fresca e seca durante os ciclos, portanto sendo a taxa de emissão de cládódios aumentada com uma dosagem de 150 kg ha⁻¹ de N (Júnior et al., 2019; Santos et al., 2024).

Pelo fato da palma forrageira ser adaptada às condições climáticas presentes no semiárido e seu uso na alimentação de ruminantes, existem estudos que usam essa cultura na produção de silagem, no entanto ela não pode ser usada de forma isolada sendo necessário uma mistura com outra cultura. Araújo et al, 2025 observou que o uso da palma em silagem com a cultura do algodão arbóreo ocasiona maiores teores de minerais, carboidratos e produção de gases na silagem e menor teor de proteína, quando os níveis da palma foram superiores a 150 g kg⁻¹ MS. Mais uma alternativa para a palma forrageira na silagem pode ser com a leguminosa gliricídia, sendo utilizadas os níveis de inclusão de palma de 15%, 30%, 45% e 60, onde a silagem com essas duas culturas é capaz de atender a demanda nutricional dos animais (Sá et al., 2021).

4. Considerações finais

O estudo demonstra que o semiárido sofre com a ocorrência dos fenômenos ENOS, causando efeito na produção agrícola como nas mudanças climáticas, sendo a palma forrageira uma alternativa viável na alimentação de animais, mas também atuando como sumidouro de carbono, portanto é necessário estudos que investiguem o comportamento desses fluxos em cactáceas em períodos de El Niño e La Niña.

5. Referências

- Alves, C. P., da Silva, T. G. F., Araújo Júnior, G. do N., de Souza, L. S. B., Jardim, A. M. da R. F., de Araújo, G. G. L., Queiroz, M. A. A., Silva, S. M. S. e., Pinheiro, A. G., & Salvador, K. R. da S. (2025). Morphophysiological indicators, phenophase and cutting time in an irrigated forage cactus–sorghum intercropping system under strategies of agricultural resilience and agriculture biosaline. *Irrigation and Drainage*, 74(1), 251–275. <https://doi.org/10.1002/IRD.3001>
- Alves, C. P., Silva, T. G. F., Alves, H. K. M. N., Jardim, A. M. da R. F., Souza, L. S. B. de, Cruz Neto, J. F. da, & Santos, J. P. A. de S. (2020). Consórcio palma-sorgo sob lâminas de irrigação: balanço de água no solo e coeficientes da cultura. *Agrometeoros*, 27(2). <https://doi.org/10.31062/agrom.v27i2.26448>
- Alves, H. K. M. N., Silva, T. G. F. da, Jardim, A. M. da R. F., de Souza, L. S. B., Araújo Júnior, G. do N., de Souza, C. A. A., de Moura, M. S. B., de Araújo, G. G. L., Campos, F. S., & da Cruz Neto, J. F. (2023). The use of mulch in cultivating the forage cactus optimizes yield in less time and increases the water use efficiency of the crop. *Irrigation and Drainage*, 72(1), 75–89. <https://doi.org/10.1002/IRD.2758>
- Araújo, C. A., Lima, R. S., Oliveira, G. F., Nascimento, D. B., Campos, F. S., Gois, G. C., Silva, T. G. F., Magalhães, A. L. R., & Araújo, G. G. L. (2025). Carbohydrate fractionation and nitrogen compounds, mineral status, and gas production in arboreal cotton and cactus silages. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 77(2), e13274. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-13274>
- Araújo Júnior, G. do N., Leite, R. M. C., Morais, J. E. F. de, Alves, C. P., Souza, C. A. A. de, Almeida, A. C. dos S., Jardim, A. M. da R. F., Souza, L. S. B. de, Eugenio, D. da S., & Silva, T. G. F. da. (2024). Growth Dynamic, Productivity, Evapotranspiration, and Water-Economic Indices of Forage Cactus under Different Irrigation Depths. *Agronomy*, 14(4), 691.

<https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14040691/S1>

- Bezerra, A. C., da Silva, J. L. B., de Oliveira Silva, D. A., Batista, P. H. D., Pinheiro, L. da C., Lopes, P. M. O., & Moura, G. B. A. (2020). Monitoramento Espaço-Temporal da Detecção de Mudanças em Vegetação de Caatinga por Sensoriamento Remoto no Semiárido Brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(1), 286–301. <https://doi.org/10.26848/RBGF.V13.1.P286-301>
- Borges, C. K., dos Santos, C. A. C., Carneiro, R. G., da Silva, L. L., de Oliveira, G., Mariano, D., Silva, M. T., da Silva, B. B., Bezerra, B. G., Perez-Marin, A. M., & de S. Medeiros, S. (2020). Seasonal variation of surface radiation and energy balances over two contrasting areas of the seasonally dry tropical forest (Caatinga) in the Brazilian semi-arid. In *Environmental Monitoring and Assessment* (Vol. 192, Issue 8). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08484-y>
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Ha, M. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, ... C. Péan (eds.)). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Cintra, P. H. N., Melo, O. F. P. de, & Menezes, J. O. da S. de. (2020). PRODUÇÃO AGRÍCOLA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PRODUTIVIDADE DE PLANTAS GRANÍFERAS NO BRASIL. *Revista Agrotecnologia - Agrotec*, 11(1), 87–94. [//www.revista.ueg.br/index.php/agrotecnologia/article/view/9720](http://www.revista.ueg.br/index.php/agrotecnologia/article/view/9720)
- Coêlho, D. de L., Dubeux, J. C. B., Santos, M. V. F. dos, Mello, A. C. L. de, Cunha, M. V. da, Santos, D. C. dos, Freitas, E. V. de, & Santos, E. R. da S. (2023). Soil and Root System Attributes of Forage Cactus under Different Management Practices in the Brazilian Semiarid. *Agronomy*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/agronomy13030743>
- Correia Filho, W. L. F., De Oliveira-Júnior, J. F., De Barros Santiago, D., De Bodas

- Terassi, P. M., Teodoro, P. E., De Gois, G., Blanco, C. J. C., De Almeida Souza, P. H., da Silva Costa, M., Gomes, H. B., & Dos Santos, P. J. (2019). Rainfall variability in the Brazilian northeast biomes and their interactions with meteorological systems and ENSO via CHELSA product. *Big Earth Data*, 3(4), 315–337. <https://doi.org/10.1080/20964471.2019.1692298>
- Cruz Neto, J. F. Da, Morais, J. E. F. de, Souza, C. A. A. de, Carvalho, H. F. D. S., Rodrigues, C. T. A., & Silva, T. G. F. da. (2017). Aplicabilidade de indicadores agrometeorológicos para análise do incremento de água por irrigação em sistemas de produção da palma forrageira, cv. Miúda. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 2(2), 98–106. <https://doi.org/10.24221/jeap.2.2.2017.1170.98-106>
- de la Casa, A. C., Ovando, G. G., & Díaz, G. J. (2021). ENSO influence on corn and soybean yields as a base of an early warning system for agriculture in Córdoba, Argentina. *European Journal of Agronomy*, 129, 126340. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2021.126340>
- Dubeux, J. C. B., Santos, M. V. F. dos, Cunha, M. V. da, Santos, D. C. dos, Souza, R. T. de A., Mello, A. C. L. de, & Souza, T. C. de. (2021). Cactus (Opuntia and Nopalea) nutritive value: A review. In *Animal Feed Science and Technology* (Vol. 275). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114890>
- Gelcer, E., Fraisse, C., Dzotsi, K., Hu, Z., Mendes, R., & Zotarelli, L. (2013). Effects of El Niño Southern Oscillation on the space–time variability of Agricultural Reference Index for Drought in midlatitudes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 174–175, 110–128. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2013.02.006>
- Gelcer, E., Fraisse, C. W., Zotarelli, L., Stevens, F. R., Perondi, D., Barreto, D. D., Malia, H. A., Ecole, C. C., Montone, V., & Southworth, J. (2018). Influence of El Niño–Southern oscillation (ENSO) on agroclimatic zoning for tomato in Mozambique. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 316–328. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2017.10.002>
- Guevara-Escobar, A., González-Sosa, E., Cervantes-Jimenez, M., Suzán-Azpiri, H., Queijeiro-Bolanos, M. E., Carrillo-Ángeles, I., & Cambron-Sandoval, V. H. (2021). Machine learning estimates of eddy covariance carbon flux in a scrub in the Mexican highland. *Biogeosciences*, 18(2), 367–392. <https://doi.org/10.5194/bg-18-367-2021>
- Hassan, S., Inglese, P., Gristina, L., Liguori, G., Novara, A., Louhaichi, M., & Sortino, G. (2019). Root growth and soil carbon turnover in Opuntia ficus-indica as affected by soil volume availability. *European Journal of Agronomy*, 105, 104–110.

<https://doi.org/10.1016/J.EJA.2019.02.012>

- Hussain, J., Khaliq, T., Ahmad, A., Akhter, J., & Asseng, S. (2018). Wheat Responses to Climate Change and Its Adaptations: A Focus on Arid and Semi-arid Environment. In *International Journal of Environmental Research* (Vol. 12, Issue 1, pp. 117–126). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0074-2>
- Jardim, A. M. da R. F., Morais, J. E. F. de, Souza, L. S. B. de, Lopes, D. de C., Silva, M. V. da, Pandorfi, H., Oliveira-Júnior, J. F. de, Silva, J. L. B. da, Steidle Neto, A. J., Morellato, L. P. C., de Lima, J. L. M. P., & Silva, T. G. F. da. (2023). A systematic review of energy and mass fluxes, and biogeochemical processes in seasonally dry tropical forests and cactus ecosystems. *Journal of South American Earth Sciences*, 126, 104330. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2023.104330>
- Jardim, A. M. da R. F., Morais, J. E. F. de, Souza, L. S. B. de, Marin, F. R., Moura, M. S. B. de, Morellato, L. P. C., Montenegro, A. A. de A., Ometto, J. P. H. B., de Lima, J. L. M. P., Dubeux Júnior, J. C. B., & Silva, T. G. F. da. (2023). Sink or carbon source? how the *Opuntia* cactus agroecosystem interacts in the use of carbon, nutrients and radiation in the Brazilian semi-arid region. *Journal of Hydrology*, 625, 130121. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2023.130121>
- Jardim, A. M. R. F., Morais, J. E. F. D. ;, Souza, L. S. B. D. ;, Souza, C. A. A. D. ;, Araújo, G. D. N. ;, Bunce, J. A., Basile, A., Maniçoba, A., Ferraz Jardim, R., Florentino De Morais, J. E., Bastos De Souza, L. S., Alves De Souza, C. A., Do, G., Júnior, N. A., Pereira Alves, C., Ítalo, G., Da Silva, N., Matheus, R., Leite, C., ... Freire Da Silva, T. G. (2023). Monitoring Energy Balance, Turbulent Flux Partitioning, Evapotranspiration and Biophysical Parameters of *Nopalea cochenillifera* (Cactaceae) in the Brazilian Semi-Arid Environment. *Plants* 2023, Vol. 12, Page 2562, 12(13), 2562. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12132562>
- Júnior, G. A., Gomes, F. T., Silva, M. J. da, Jardim, A. M. da R. F., Simões, V. J. L. P., Izidro, J. L. P. S., Leite, M. L. de M. V., Teixeira, V. I., & Silva, T. G. F. da. (2019). Estresse hídrico em plantas forrageiras: Uma revisão. *Pubvet*, 13(01). <https://doi.org/10.31533/PUBVET.V13N01A241.1-10>
- León-González, F., Fuentes-Ponce De De, M. H., Bautista-Cruz, A., Leyva-Pablo, T., Castillo-Juárez, H., & Rodríguez-Sánchez, L. M. (2018). Cactus crop as an option to reduce soil C–CO₂ emissions in soils with declining fertility. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(1). <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0481-3>
- Lucena, R. L., Ferrer, É., & Guilhermino, M. M. (2021). Mitigando os riscos da seca

- através de ações de recuperação e preservação do bioma caatinga no semiárido brasileiro / Mitigating dry risks through actions for the recovery and preservation of the caatinga biome in the brazilian semi-arid. *Brazilian Journal of Development*, 7(4), 36546–36557. <https://doi.org/10.34117/BJDV7N4-221>
- Marengo Orsini, J. A., Alves, L. M., Alvala, R. C. S., Cunha, A. P., Brito, S., & Moraes, O. L. L. (2017). Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 90(2), 1973–1985. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>
- Matos, L. V, Donato, S. R., Kondo, ; M K, & Lani, J. (2021). *Revista Brasileira de Geografia Física v.14, n.02 (2021) 554-590.*
- Medeiros, F. J. de, & Oliveira, C. P. de. (2021). Dynamical Aspects of the Recent Strong El Niño Events and Its Climate Impacts in Northeast Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, 178(6), 2315–2332. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02758-3>
- Mendes, K. R., Campos, S., da Silva, L. L., Mutti, P. R., Ferreira, R. R., Medeiros, S. S., Perez-Marin, A. M., Marques, T. V., Ramos, T. M., de Lima Vieira, M. M., Oliveira, C. P., Gonçalves, W. A., Costa, G. B., Antonino, A. C. D., Menezes, R. S. C., Bezerra, B. G., & Santos e Silva, C. M. (2020). Seasonal variation in net ecosystem CO₂ exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. *Scientific Reports 2020 10:1*, 10(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66415-w>
- Mendes, K. R., Campos, S., Mutti, P. R., Ferreira, R. R., Ramos, T. M., Marques, T. V., Dos Reis, J. S., de Lima Vieira, M. M., Silva, A. C. N., Marques, A. M. S., da Silva, D. T. C., da Silva, D. F., Oliveira, C. P., Gonçalves, W. A., Costa, G. B., Pompelli, M. F., Marengo, R. A., Antonino, A. C. D., Menezes, R. S. C., ... Santos E Silva, C. M. (2021). Assessment of SITE for CO₂ and Energy Fluxes Simulations in a Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga Ecosystem). *Forests 2021, Vol. 12, Page 86*, 12(1), 86. <https://doi.org/10.3390/F12010086>
- Nóia Júnior, R. de S., & Sentelhas, P. C. (2019). Soybean-maize off-season double crop system in Brazil as affected by El Niño Southern Oscillation phases. *Agricultural Systems*, 173, 254–267. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2019.03.012>
- Nunes Alves, H. K. M., da Rosa F. Jardim, A. M., de Souza, L. S. B., & da Silva, T. G. F. (2018). The application of agrometeorological techniques contributes to the agricultural resilience of forage cactus: A review. *Amazonian Journal of Plant Research*, 2(3), 207–220. <https://doi.org/10.26545/ajpr.2018.b00026x>
- Oliveira, M. L., dos Santos de, C. A. C., de Oliveira, G., Silva, M. T., da Silva, B. B.,

- Cunha, J. E. d. 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>
- Pereira Alves, C., Sandra Bastos de Souza, L., Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim, A., do Nascimento Araújo Júnior, G., Gebson Pinheiro, A., Renan da Silva Salvador, K., Ítalo Novaes da Silva, G., George Freire da Silva, T., Ferraz Nogueira, G., Tomé de Souza Ramos, -José, & Talhada, S. (2021). *Revista Brasileira de Geografia Física Resiliência agrícola no cultivo consorciado palma-sorgo em ambiente semiárido: uma revisão*.
- Pereira, P. D. C., Da Silva, T. G. F., Zolnier, S., De Moraes, J. E. F., & Dos Santos, D. C. (2015). Growth evolution of cactus forage drip irrigated. *Revista Caatinga*, 28(3), 184–195. <https://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n321rc>
- Queiroz, M. G. de, da Silva, T. G. F., Zolnier, S., Jardim, A. M. da R. F., de Souza, C. A. A., Araújo Júnior, G. do N., de Moraes, J. E. F., & de Souza, L. S. B. (2020). Spatial and temporal dynamics of soil moisture for surfaces with a change in land use in the semi-arid region of Brazil. *CATENA*, 188, 104457. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2020.104457>
- Ramirez-Rodrigues, M. A., Asseng, S., Fraisse, C., Stefanova, L., & Eisenkolbi, A. (2014). Tailoring wheat management to ENSO phases for increased wheat production in Paraguay. *Climate Risk Management*, 3, 24–38. <https://doi.org/10.1016/J.CRM.2014.06.001>
- Rodrigues, L. de O., Souza, W. M. de, Costa, V. S. de O., & Pereira, M. L. T. (2017). Influência dos eventos de El Niño e La Niña no regime de precipitação do Agreste de Pernambuco (Influence of El Niño and La Niña events on rainfall of Agreste Pernambuco). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10(6), 1995–2009. <https://doi.org/10.26848/RBGF.V10.6.P1995-2009>
- Sá, M. K. N. de, Andrade, A. P. de, Magalhães, A. L. R., Valença, R. de L., Campos, F. S., Araújo, F. dos S., & Araújo, G. G. L. de. (2021). Cactus pear silage with *Gliricidia Sepium*: food alternative for the semiarid region. *Research, Society and Development*, 10(2), e27210212473–e27210212473. <https://doi.org/10.33448/RSD-V10I2.12473>
- Santiago, D. de B., Barbosa, H. A., Correia Filho, W. L. F., Oliveira-Júnior, J. F. de, Paredes-Trejo, F., & de Oliveira Buriti, C. (2022). Variability of Water Use

- Efficiency Associated with Climate Change in the Extreme West of Bahia. *Sustainability (Switzerland)*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/su142316004>
- Santos, A. R. M., Bezerra Dos, R. C. A., Cordeiro, L. R. B. A., Leite, M. L. de M. V., Salvador, K. R. da S., de Sousa, L. D. C., Nogueira, J. C., Calaça, J. D. S. G., de Carvalho, F. G., Dos Santos, W. R., & da Silva, T. G. F. (2023). Valor nutritivo de plantas forrageiras cultivadas no semiárido brasileiro: Uma revisão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(3), 1466–1489. <https://doi.org/10.26848/RBGF.V16.3.P1466-1489>
- Santos, C. A. C., Mariano dos, D. A., das Chagas A. do Nascimento, F., Fabiane, F. R., de Oliveira, G., Silva, M. T., da Silva, L. L., da Silva, B. B., Bezerra, B. G., Safa, B., de S. Medeiros, S., & Neale, C. M. U. (2020). Spatio-temporal patterns of energy exchange and evapotranspiration during an intense drought for drylands in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 85, 101982. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2019.101982>
- Santos e Silva, C. M., Bezerra, B. G., Mendes, K. R., Mutti, P. R., Rodrigues, D. T., Costa, G. B., de Oliveira, P. E. S., Reis, J., Marques, T. V., Ferreira, R. R., Campos, S., Ramos, T. M., Vieira, M. M. L., de Oliveira, A. C. C. F., Câmara da Silva, C. L., Silva, A. C., Antonino, A. C. D., & Menezes, R. S. C. (2024). Rainfall and rain pulse role on energy, water vapor and CO₂ exchanges in a tropical semiarid environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 345, 109829. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2023.109829>
- Santos, J. P. A. de S., do Nascimento Araújo Júnior, G., Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim, A., André Alves de Souza, C., Orlando Nunes da Silva, J., Renan da Silva Salvador, K., Sandra Bastos de Souza, L., George Freire da Silva, T., Ferraz Nogueira, G., Tomé de Souza Ramos, -José, & Talhada, S. (2021). *Revista Brasileira de Geografia Física Técnicas de manejo sustentável para o aporte forrageiro da agricultura familiar no semiárido brasileiro: palma forrageira, irrigação e fondren*.
- Santos, J. P. A. de S., Oliveira, A. C. de, Moraes, J. E. F. de, Jardim, A. M. da R. F., Alves, C. P., Araújo Júnior, G. do N., Souza, C. A. A. de, Silva, M. J. da, Souza, L. F. de, Souza, L. S. B. de, Campos, F. S., Simões, A. do N., Queiroz, M. A. Á., Montenegro, A. A. de A., & Silva, T. G. F. da. (2024). Morphophysiological responses, water, and nutritional performance of the forage cactus submitted to different doses of nitrogen. *Field Crops Research*, 308, 109273. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2024.109273>

- Santos, T. P., & Nóbrega, M. A. da. (2023). The influence of El Niño and La Niña phenomena in Brazil: The case of the rainfall distribution of the municipality of Vitória da Conquista in the state of Bahia. In *CONNECTING EXPERTISE MULTIDISCIPLINARY DEVELOPMENT FOR THE FUTURE*. Seven Editora. <https://doi.org/10.56238/connexpemultidisdevolpfut-062>
- Scott, R. L., Biederman, J. A., Hamerlynck, E. P., & Barron-Gafford, G. A. (2015). The carbon balance pivot point of southwestern U.S. semiarid ecosystems: Insights from the 21st century drought. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(12), 2612–2624. <https://doi.org/10.1002/2015JG003181>
- Silva, A. C., Mendes, K. R., Santos E Silva, C. M., Rodrigues, D. T., Costa, G. B., da Silva, D. T. C., Mutti, P. R., Ferreira, R. R., & Bezerra, B. G. (2021). Energy Balance, CO2 Balance, and Meteorological Aspects of Desertification Hotspots in Northeast Brazil. *Water* 2021, Vol. 13, Page 2962, 13(21), 2962. <https://doi.org/10.3390/W13212962>
- Silva, G. I. N. da, Jardim, A. M. da R. F., Alves, H. K. M. N., Souza, M. de S., Souza, C. A. A. de, Júnior, G. do N. A., Alves, C. P., Pinheiro, A. G., Salvador, K. R. da S., Leite, R. M. C., Costa, S. A. T. da, Silva, M. J. da, & Silva, T. G. F. da. (2020). Cultivation of forage plants of regional appeal to the Brazilian Semiarid from the perspective of agrometeorological techniques to improve resilience: a review. *Research, Society and Development*, 9(10), e1449108291–e1449108291. <https://doi.org/10.33448/RSD-V9I10.8291>
- Silva, M. V. da, Pandorfi, H., Jardim, A. M. da R. F., Oliveira-Júnior, J. F. de, Divincula, J. S. da, Giongo, P. R., Silva, T. G. F. da, Almeida, G. L. P. de, Moura, G. B. de A., & Lopes, P. M. O. (2021). Spatial modeling of rainfall patterns and groundwater on the coast of northeastern Brazil. *Urban Climate*, 38, 100911. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2021.100911>
- Silva, P. F. da, Lima, J. R. de S., Antonino, A. C. D., Souza, R., de Souza, E. S., Silva, J. R. I., & Alves, E. M. (2017). Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. *Journal of Arid Environments*, 147, 71–82. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2017.09.003>
- Souza, C. A. A. de, Jardim, A. M. da R. F., de Souza, L. S. B., Júnior, G. do N. A., Alves, C. P., de Moraes, J. E. F., Lopes, D. de C., Steidle Neto, A. J., Salvador, K. R. da S., & da Silva, T. G. F. (2023). Intercomparison of micrometeorological variables, surface energy fluxes, and evapotranspiration in different landscapes of the Brazilian

- semi-arid region. *Agricultural and Forest Meteorology*, 341, 109679. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2023.109679>
- Souza, L. S. B. de, de Moura, M. S. B., Sedyama, G. C., & da Silva, T. G. F. (2015). Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 50(8), 627–636. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000800001>
- Wu, R., Lin, M., & Sun, H. (2020). Impacts of different types of El Niño and La Niña on northern tropical Atlantic sea surface temperature. *Climate Dynamics*, 54(9–10), 4147–4167. <https://doi.org/10.1007/S00382-020-05220-7/FIGURES/15>
- Zhang, A., Jia, G., Epstein, H. E., & Xia, J. (2017). ENSO elicits opposing responses of semi-arid vegetation between Hemispheres. *Scientific Reports 2017 7:1*, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep42281>
- Zhang, L., Xiao, J., Zheng, Y., Li, S., & Zhou, Y. (2020). Increased carbon uptake and water use efficiency in global semi-arid ecosystems. *Environmental Research Letters*, 15(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab68ec>
- Zhang, W., Luo, G., Yuan, X., Li, C., Xie, M., Wang, Y., Ma, X., Shi, H., Hamdi, R., Hellwich, O., Ma, X., Termonia, P., & De Maeyer, P. (2023). New data-driven method for estimation of net ecosystem carbon exchange at meteorological stations effectively increases the global carbon flux data. *Methods in Ecology and Evolution*, 14(9), 2449–2463. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14188>

CAPÍTULO 2 – IMPACTO DO CICLO EL NIÑO/LA NIÑA NO BALANÇO DE ENERGIA, CARBONO E ÁGUA EM CULTIVO DE CACTO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO: Os ecossistemas terrestres desempenham papel fundamental na regulação do clima por meio das trocas de energia e carbono com a atmosfera. No entanto, as modificações no uso da terra, sobretudo em regiões semiáridas, afetam diretamente as trocas de energia, carbono e água. Nesses ambientes, durante períodos de El Niño, ocorre redução das chuvas, resultando em secas prolongadas, enquanto no La Niña há aumento no volume de precipitação. Diante desse contexto, torna-se necessário investigar se a palma forrageira atua como fonte ou sumidouro de carbono. Logo, presente estudo tem como objetivo analisar os padrões dos fluxos de energia, água, radiação e carbono em cultivo de cactáceas, bem como avaliar os efeitos da sazonalidade hídrica sobre sua dinâmica em ambiente semiárido durante períodos de El Niño e La Niña. A pesquisa foi conduzida no semiárido brasileiro no período de janeiro de 2022 a dezembro de 2024 em cultivo de palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.] sob regime de sequeiro. Os dados obtidos foram analisados por meio do método de regressão linear, posteriormente, foi realizada uma análise de componentes principais para verificar as inter-relações entre as estações e os parâmetros ambientais do cacto como a fixação de carbono e respiração no ecossistema. Os resultados apresentam que a produtividade primária bruta acumulada para La Niña foi de (1704,5 g C m⁻²), El Niño (1970,8 g C m⁻²) e Neutro (354,7 g C m⁻²) e a respiração de ecossistema no La Niña foi de (1211,8 g C m⁻²), El Niño (1028,4 g C m⁻²) e Neutro (110,5 g C m⁻²), onde a troca líquida de CO₂ no ecossistema de La Niña foi de (-498,0 g C m⁻²), El Niño (-911,8 g C m⁻²) e Neutro (-244,2 g C m⁻²). Portanto, a palma se comporta como sumidouro de carbono independente do fenômeno que está ocorrendo, sendo assim, constatamos como alternativa viável para redução dos impactos ambientais e mudanças climáticas.

Palavras-chaves: Agrossistema, *Opuntia*, Sazonalidade ambiental, Sumidouro de carbono.

CHAPTER 2 – IMPACT OF THE EL NIÑO/LA NIÑA CYCLE ON THE ENERGY, CARBON AND WATER BALANCE IN CACTUS FARMING IN THE BRAZILIAN SEMI-ARID REGION.

ABSTRACT: Terrestrial ecosystems play a fundamental role in regulating the climate through the exchange of energy and carbon with the atmosphere. However, changes in land use, especially in semiarid regions, directly affect the exchange of energy, carbon, and water. In these environments, during El Niño periods, rainfall decreases, resulting in prolonged droughts, while during La Niña periods, precipitation increases. Given this context, it is necessary to investigate whether forage cactus acts as a carbon source or sink. Therefore, this study aims to analyze the patterns of energy, water, radiation, and carbon fluxes in cactus cultivation, as well as to assess the effects of water seasonality on their dynamics in a semiarid environment during El Niño and La Niña periods. The research was conducted in the Brazilian semi-arid region from January 2022 to December 2024 in forage cactus [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.] cultivation under a rainfed regime. The data obtained were analyzed using the linear regression method, subsequently, a principal component analysis was performed to verify the interrelationships between the seasons and the environmental parameters of the cactus such as carbon fixation and respiration in the ecosystem. The results show that the accumulated gross primary productivity for La Niña was (1704.5 g C m⁻²), El Niño (1970.8 g C m⁻²) and Neutral (354.7 g C m⁻²) and the ecosystem respiration in La Niña was (1211.8 g C m⁻²), El Niño (1028.4 g C m⁻²) and Neutral (110.5 g C m⁻²), where the net CO₂ exchange in the La Niña ecosystem was (-498.0 g C m⁻²), El Niño (-911.8 g C m⁻²) and Neutral (-244.2 g C m⁻²). Therefore, the palm tree acts as a carbon sink regardless of the phenomenon that is occurring, thus, we see it as a viable alternative for reducing environmental impacts and climate change.

Keywords: Agrosystem, *Opuntia*, Environmental seasonality, Carbon sink.

1. Introdução

Os ecossistemas terrestres contribuem fundamentalmente na regulação do clima por meio de trocas de energia e carbono com a atmosfera, sequestrando CO₂ da atmosfera, incorporando carbono (C) na biomassa abaixo e acima do solo, tornando-se um excelente sumidouro de carbono (Rodda et al., 2021; Zeng et al., 2020). Entretanto, com a modificação do uso da terra, há impactos na regulação do clima afetando os processos de trocas de energia, carbono e água em regiões semiáridas e sob variação dos fenômenos atmosféricos, como o El Niño e La Niña. O El Niño-Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno climático oscilatório que ocorre em escala global no ambiente atmosférico e no oceano, ocorrendo naturalmente entre dois e sete anos (Burton et al., 2020).

Este padrão climático é regulado pela diferença de pressão entre as regiões ocidentais e orientais do oceano pacífico equatorial, conhecida como Oscilação Sul. Essa diferença influencia a intensidade dos ventos alísios, afetando a distribuição da temperatura da superfície do mar e os fluxos de umidade entre o oceano e a atmosfera. Na fase do El Niño, há aumento na temperatura anormal das águas do Oceano Pacífico Equatorial Central e Leste. Por sua vez, durante La Niña o efeito é inverso, ou seja, há uma diminuição anormal da temperatura do oceano (Correia Filho et al., 2019; Zhang et al., 2017).

O efeito dessas mudanças influencia nas frequências do sistema meteorológico, alterando a intensidade da chuva (Correia Filho et al., 2019). Essas alterações nas estações chuvosas e secas podem levar a mudanças nos fluxos de energia e evapotranspiração (ET) em diferentes escalas, bem como, promover modificações na liberação de energia pela vegetação, influenciando no crescimento e fenologia (Jardim et al., 2023b). Esses fatores podem gerar um desequilíbrio no processo de assimilação de CO₂ na fotossíntese e a perda do CO₂ durante a fase de respiração, afetando o estado de sumidouro ou fonte de carbono do ecossistema (Flanagan & Flanagan, 2018; Flores-Rentería et al., 2023).

Nesse contexto, em regiões áridas e semiáridas, eventos climáticos extremos impactam o funcionamento do ecossistema mudando os processos hidrológicos, como ET (Ludewig & Shoko, 2024). Assim, é necessário utilizar espécies adaptadas as condições climáticas dos ambientes árido e semiárido e, entre as diversas espécies, destaca-se a palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw). Haw.], devido sua versatilidade de uso agrícola e econômico. Essa espécie de Cactaceae apresenta metabolismo ácido das crassuláceas (CAM) e se caracteriza por sua eficiente capacidade de armazenamento de água e estratégia de absorção de carbono.

As pesquisas recentes indicam que a palma forrageira é uma cultura com potencial para ser sumidouro de C ao longo do ano, nas diferentes estações do ano e condições climáticas, com troca líquida de CO₂ no ecossistema cumulativa em três anos de -1.130 g C m⁻² (Jardim et al., 2023a). Outra espécie com CAM, a *Agave tequilana*, demonstrou uma alta assimilação de CO₂ e reforçando a capacidade de adaptação dessas espécies às mudanças climáticas (Owen et al., 2016; Skogberg et al., 2025).

Nesse sentido, é fundamental identificar a interação solo-planta-atmosfera e o comportamento das variáveis ambientais durante os fenômenos de ENOS e afetam o comportamento de uma forma de uso e cobertura da terra para funcionar como fonte ou sumidouro de carbono. Diversos estudos avaliaram os efeitos fenômenos ENOS, em ciclos de El Niño/La Niña, em diferentes áreas, como florestas e pastagens (Munyati, 2025; Nogueira et al., 2023; Ramirez-Rodrigues et al., 2014; Silva et al., 2025), no entanto, na literatura são incipientes estudos acerca da oscilação do comportamento dos fluxos de energia, carbono e água em áreas cultivadas com cactos em períodos de El Niño e La Niña.

Diante do exposto, o estudo é baseado no seguinte questionamento, os fluxos de energia e absorção de CO₂ em cultivo de palma forrageira são dependentes das condições climáticas, assim, nos ciclos de El Niño e La Niña a palma forrageira vai atuar como fonte ou sumidouro de Carbono? Portanto, objetivou-se investigar os padrões dos fluxos de energia, radiação, água e carbono em plantio de cactácea e suas relações com a dinâmica de crescimento e a sazonalidade do regime hídrico no Semiárido brasileiro, em período de El Niño e La Niña.

2. Materiais e métodos

2.1. Área de estudos

O estudo foi realizado no município de Floresta, Pernambuco, Brasil (Figura 1 - 08°35'55" S, 38°33'50" O e 367 m acima do nível do mar). O clima da região é classificado como semiárido quente (BSh), na classificação de Köppen, com média anual de chuva de 489 mm, umidade relativa do ar de 61%, temperatura média do ar de 26,1 °C e demanda atmosférica superior a 2.000 mm ano⁻¹ (Alvares et al., 2013). A média anual da velocidade do vento é de 1,8 m s⁻¹, com direção predominante no Sudeste. O solo da área é do tipo Luvisolo Crômico, com textura franco arenosa (56% areia, 41% silte e 3% argila), densidade média de 1,33 g cm⁻³, porosidade média total de 48,05%, pH de 5,35,

condutividade elétrica média de 0,28 dS m⁻¹, capacidade média de troca catiônica de 8,08 cmol_c dm⁻³ e saturação média por bases de 78,60% (Jardim et al., 2023a).

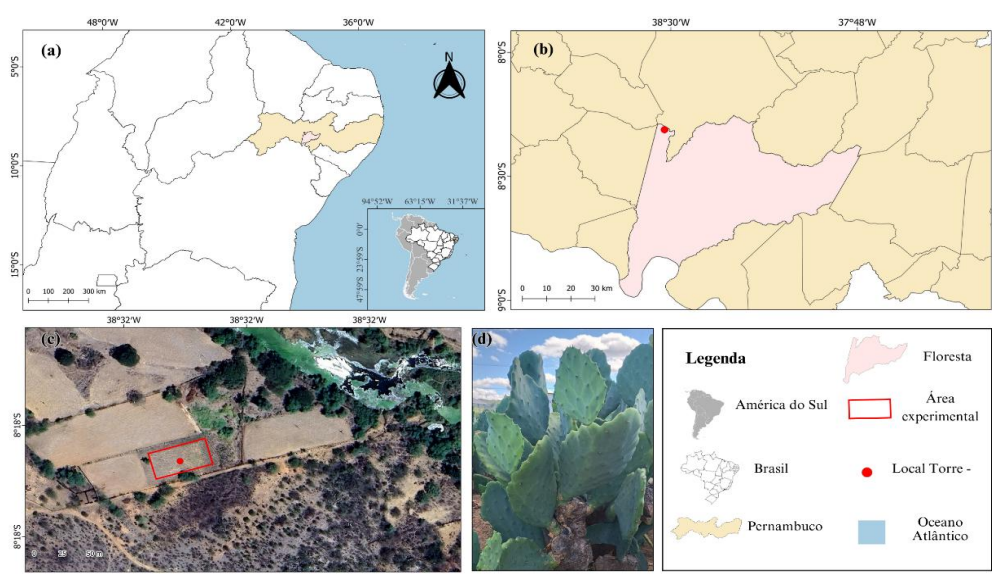


Figura 1. Localização geográfica da área de estudo do município de Floresta, Pernambuco, Brasil (a–b). Visão geral do campo experimental, com localização da torre micrometeorológica (c) no local cultivado de *Opuntia stricta* (Haw.) Haw. (d).

Fonte: Autor
Sistema de referência: SIRGAS 2000

A Tabela 1 mostra o período da ocorrência da pesquisa, usando o Índice Oceânico Niño (ONI), contemplando os 3 anos dos dados coletados e identificação da ocorrência de El Niño, La Niña e a fase de neutralidade. Esse sistema se baseia na anomalia da temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico em relação à normal (SSTA), na região Niño 3.4. Vale ressaltar que foi considerado no ano de 2023 os meses de fevereiro e março para La Niña e abril para El Niño, que pela a NOAA seriam de neutralidade, para uma melhor exploração dos dados.

Tabela 2. Ocorrência de La Niña, Neutralidade (período de transição) e El Niño no período de janeiro de 2022 a dezembro de 2024 usando o Índice Oceânico Niño (ONI), (NOAA Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos EUA, 2024).

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2022	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN
2023	LN	NE	NE	NE	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN	EN
2024	EN	EN	EN	EN	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE

LN - La Niña; NE - Neutro; EN - El Niño.

Fonte: NOAA (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos EUA)

2.2.Procedimentos de condução experimental

Os dados foram coletados no período de janeiro de 2022 a dezembro de 2024, em um cultivo de palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.], implantado desde agosto de 2014 em uma área de um hectare. No preparo do solo foi realizada aração, gradagem e sulcamento com espaçamento de cultivo de 2,0 x 0,5 m, com uma total de densidade de 10.000 plantas ha⁻¹ (Figura 2). As plantas foram cultivadas em regime de sequeiro, sem aplicação de adubação química ou orgânica.

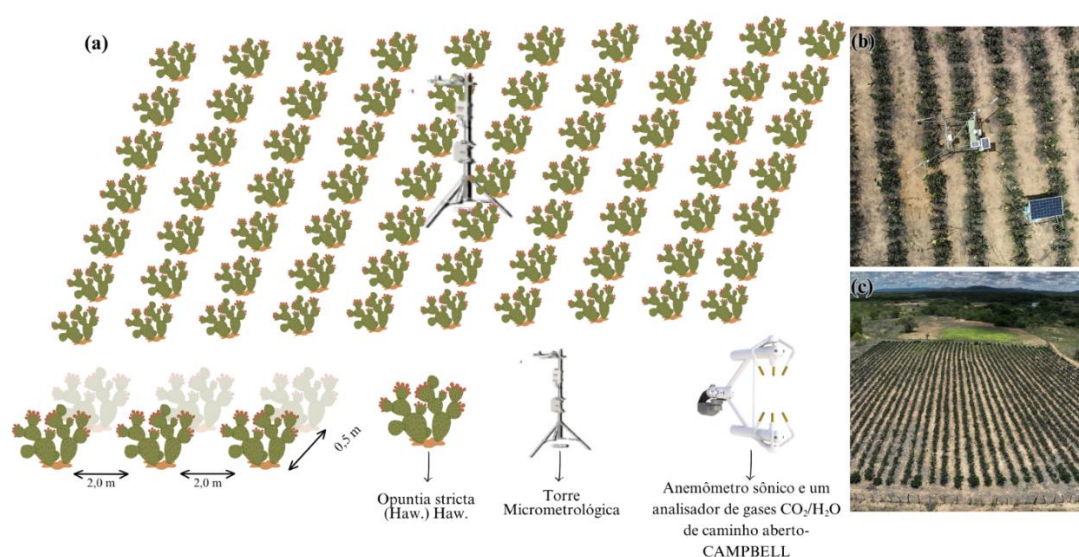


Figura 2. Desenho esquemático da área experimental (a). Vista superior da torre micrometeorológica (b) e da área experimental (c).

Fonte: Autor

2.3.Medidas micrometeorológicas e instrumentalização

As medições micrometeorológicas foram realizadas utilizando uma torre com 3 m de altura, instalada no centro da área experimental (Figura 1). Todos os dados coletados pelos sensores, descritos abaixo, foram registrados através de um datalogger CR3000 (CS616, Campbell Scientific, Logan, UT, EUA), a cada 60 segundos e em intervalos de armazenamento de 10 minutos.

Para a realização da medição dos componentes saldo de radiação (Rn) foi utilizado sensores do tipo termopilha de célula fechada (NR-Lite, Kipp & Zonen, Delft, Holanda), piranômetros (SP-230, Apogee Instruments, Logan, Utah, EUA) para medição da radiação ascendente e descendente de ondas curtas e longas. Tais sensores foram

instalados a 2,8 m acima da copa para que possa computar a radiação incidente e a radiação refletida pelo dossel.

A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) foi monitorada utilizando um sensor quântico LI-190SB (LI-COR, Inc., Lincoln, Nebraska, EUA) instalado na parte superior e abaixo do dossel. Para o fluxo de calor no solo (G), as medições foram realizadas através de uma placa de fluxo de calor HFT3 (REBS, Hukseflux, Delft, Holanda) instalada na profundidade de 0,05 m perto da linha de cultivo das palmas.

As medições da temperatura e umidade relativa do ar, foram feitas por meio de dois termo-higrômetros (HMP45C, Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA) instalados para formar um perfil vertical de 0,5 e 1,5 m acima da superfície do solo. Na altura de 3 m acima do solo foi instalado um pluviômetro automático (CS700-L, Hydrological Services Rain Gauge, Liverpool, Austrália) para medir a altura pluviométrica. A umidade do solo foi quantificada através da reflectometria no domínio do tempo (TDR) (CS616, Campbell Scientific, Logan, UT, EUA), enterrado de forma vertical próximo a torre.

No presente estudo, a troca líquida de CO₂ do ecossistema (NEE) foi realizada utilizando a plataforma online desenvolvida pelo Instituto Max Planck (<https://www.bgc-jena.mpg.de/REddyProc/ui/REddyProc.php>). Para isso, a NEE foi monitorado por meio da técnica de Eddy Covariance, onde, representa o balanço líquido de CO₂ entre o ecossistema e atmosfera, sendo determinada pela produtividade primária bruta (GPP) e pela respiração do ecossistema (Reco). Além disso, os valores negativos de NEE significam absorção líquida de CO₂ pelo ecossistema e valores positivos a liberação líquida de CO₂ no ecossistema (Silva et al., 2022).

2.4. Estimativa de energia de superfície

As medições dos fluxos de CO₂ foram realizadas utilizando um sistema de Eddy Covariance, composto por um anemômetro sônico e um analisador de gases CO₂/H₂O de caminho aberto (IRGASON, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, EUA). Os dados foram armazenados a cada 30 minutos em um datalogger CR3000 (Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, EUA).

O sistema de Eddy Covariance estava fixo na altura de 2,0 m do nível do solo com orientação para o Sudeste (135°) devido à maior predominância do vento. Desta forma, é possível atestar que as medições do sistema de fluxo ocorreram de forma adequada dentro da área de cobertura. Além disso, foi utilizado o software EasyFlux PC (Campbell Scientific Inc.) para realizar a correção dos dados quando necessário.

A estimativa da radiação da superfície da Terra foi determinada a partir da radiação líquida de onda curta (Equação 1), radiação líquida de onda longa (Equação 2) e o saldo de radiação (Equação 3). O albedo da superfície (α) cultivada com cacto foi calculada através da Equação 4, conforme descrito por Jardim et al. (2023a).

$$SR_n = SR_d - SR_u \quad (\text{eq. 1})$$

$$LR_n = LR_d - LR_u \quad (\text{eq. 2})$$

$$R_n = SR_d - LR_n \quad (\text{eq. 3})$$

$$\alpha = \frac{SR_u}{SR_d} \quad (\text{eq. 4})$$

em que, SR_d a radiação descendente de onda curta, SR_u radiação ascendente de onda curta, LR_d radiação descendente de onda longa, LR_u radiação ascendente de onda longa (W m^{-2}).

2.5. Particionamento do orçamento de energia

O balanço de energia da superfície foi realizado utilizando o princípio da conservação de energia (Equação 5).

$$R_n = LE + H + G \quad (\text{eq. 5})$$

Sendo R_n o saldo de radiação, LE o fluxo de calor latente (W m^{-2}), H o fluxo de calor sensível (W m^{-2}) e G o fluxo de calor no solo (W m^{-2}).

Todos os dados foram registrados no horário local, correspondente a três horas atrás do horário de Greenwich (Reino Unido). As contribuições da energia metabólica, armazenamento de calor no tecido vegetal e na copa, assim como advecção horizontal, foram desconsideradas no presente estudo. Os componentes mencionados na Equação 1 geralmente são positivos durante o dia, com radiação líquida e fluxo de calor do solo positivos para baixo, enquanto fluxos de calor latente e sensível são positivos para cima.

2.5.1. Fechamento do balanço energético

No uso do sistema de Eddy Covariance é comum a ocorrência de um desequilíbrio de energia, que é ocasionado devido o somatório dos fluxos de calor latente ser menor que a energia disponível medida. Desta forma, utilizou-se um modelo de regressão linear nos dados de meia hora, ocasionando uma conexão entre os fluxos turbulentos e a energia disponível sendo uma variável dependente e a outra independente, respectivamente

(Campos et al., 2019; Heusinkveld et al., 2004; Jardim et al., 2023a; Widmoser & Wohlfahrt, 2018). Além disso, não se forçou o fechamento do balanço de energia (EBC) (W m^{-2}):

$$EBC = \frac{(LE + H)}{(R_n - G)} \quad (\text{eq. 6})$$

2.6. Análise biométrica, biomassa e rendimento de forragem

As coletas das variáveis biométricas foram realizadas em intervalos de 30 dias durante o período experimental. As variáveis adquiridas foram o comprimento (CL, cm) e a largura (CW, cm) do cladódio. Neste estudo, utilizou-se equações para calcular a área do cladódio (CA - Equação 7, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) e o índice de área do cladódio (CAI - Equação 8, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (Pinheiro et al., 2014). Para o cálculo dos índices morfofisiológicos utilizou-se o modelo sigmoidal com três parâmetros (Equação 9) (Jardim et al., 2023a; Jardim et al., 2023b).

$$CA = 0,7086 \times \left[\frac{1 - e^{(-0,000045765 \times CL \times CW)}}{0,000045765} \right] \quad (\text{eq. 7})$$

$$CAI = \left[\sum_n^{i=1} \frac{(CA)}{\frac{10.000}{(S1 \times S2)}} \right] \quad (\text{eq. 8})$$

$$\gamma = \frac{a}{1 + e^{\left(-\frac{x-x_0}{b}\right)}} \quad (\text{eq. 9})$$

em que, o número de observações (i), o número total de observações (n), o fator de conversão centímetro quadrado para metro quadrado (10.000), para os espaçamentos entre plantas e entre fileiras dos cactos ($S1 \times S2$). Para análise morfofisiológica os parâmetros de utilizados foram, variável da resposta (γ) em $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$, valor máximo da taxa (a) em m^2 , os dias acumulados (x) em dias, o número de dias necessários para que a planta tenha expressado 50% da taxa máxima e número de dias necessários para o início da taxa (b) em dias.

A partir dos valores obtidos pelo índice de área do cladódio e os valores de biomassa seca, foram calculados os índices morfofisiológicos, como a TCA (taxa de crescimento absoluto, $\text{Mg ha}^{-1} \text{ } ^\circ\text{Cdia}^{-1}$), TCR (taxa de crescimento relativo, $\text{Mg ha}^{-1} \text{ } ^\circ\text{Cdia}^{-1}$).

¹) e TAL (taxa de assimilação líquida, Mg ha⁻¹ °Cdia⁻¹), como a ACE (área do cladódio específica, ha Mg⁻¹) (Silva et al., 2009).

2.7. Produtividade da água da cultura

Para contabilizar a produtividade da água da cultura, foi utilizada a Equação 10, sendo a razão entre a biomassa da cultura e evapotranspiração (Silva et al., 2023).

$$WP_{C_{ET}} = \frac{DMY}{ET} \quad (\text{eq. 10})$$

em que, $WP_{C_{ET}}$ é a produtividade de água da cultura, o DMY é o rendimento de biomassa da matéria seca da cultura (g m⁻²) e ET é a evapotranspiração (mm). Sendo o DMY estimado pelo rendimento de matéria seca (g m⁻²) e a ET pela evapotranspiração acumulada durante o período, em mm.

2.8. Eficiência da radiação

Para quantificar a eficiência do uso da radiação, no período do estudo utilizou-se a Equação 11.

$$EUR = \frac{DMY}{I_0 \times fPAR} \quad (\text{eq. 11})$$

em que, I_0 é a quantidade da radiação fotossinteticamente ativa diretamente sobre o dossel (MJ m⁻²), e $fPAR$ é a fração de radiação fotossinteticamente ativa interceptada, para calcular a fração, utilizou-se a Equação 12.

$$fPAR = \left(1 - \frac{PAR_b}{I_0}\right) \quad (\text{eq. 12})$$

em que, PAR_b é a radiação fotossinteticamente medida abaixo da copa da planta (MJ m⁻² dia⁻¹) e o I_0 é a quantidade da radiação fotossinteticamente ativa diretamente sobre o dossel (MJ m⁻²).

2.9. Processamento dos dados e análise estatística

Os dados obtidos dos fluxos foram processados por meio do método de regressão linear com o objetivo de determinar o fechamento do balanço de energia do sistema de Eddy Covariance, por meio da razão de energia disponível e os fluxos turbulentos de calor encontrados durante todo o período experimental. Análise descritiva e análise de componentes principais foi realizada para poder verificar as inter-relações entre as

estações e o comportamento ambiental dos cactos. Os componentes dos balanços de carbono, energia e radiação durante os períodos de ENOS (La Niña, El Niño e Neutro) foram apresentados em curvas e boxplots ao longo do tempo (ou seja, hora, mês e ano). Todos os boxplots incluem mediana, limites e 1,5 vezes os intervalos interquartis superior e inferior. Todo o processamento e a análise dos dados foram realizados utilizando o programa R versão 4.1.3.

3. Resultados

3.1. Condições ambientais durante o período experimental

Durante o período de experimento, os meses de janeiro de 2022 a março de 2023 foram de La Niña, os meses de abril de 2023 a abril de 2024 foi de El Niño e fase de neutralidade de maio a dezembro de 2024 (Tabela 1). Deste modo, observou-se as condições ambientais para os períodos de La Niña (LN), El Niño (EN) e Neutro (NE) e a Figura 3 apresenta a variabilidade das condições ambientais na área de estudo.

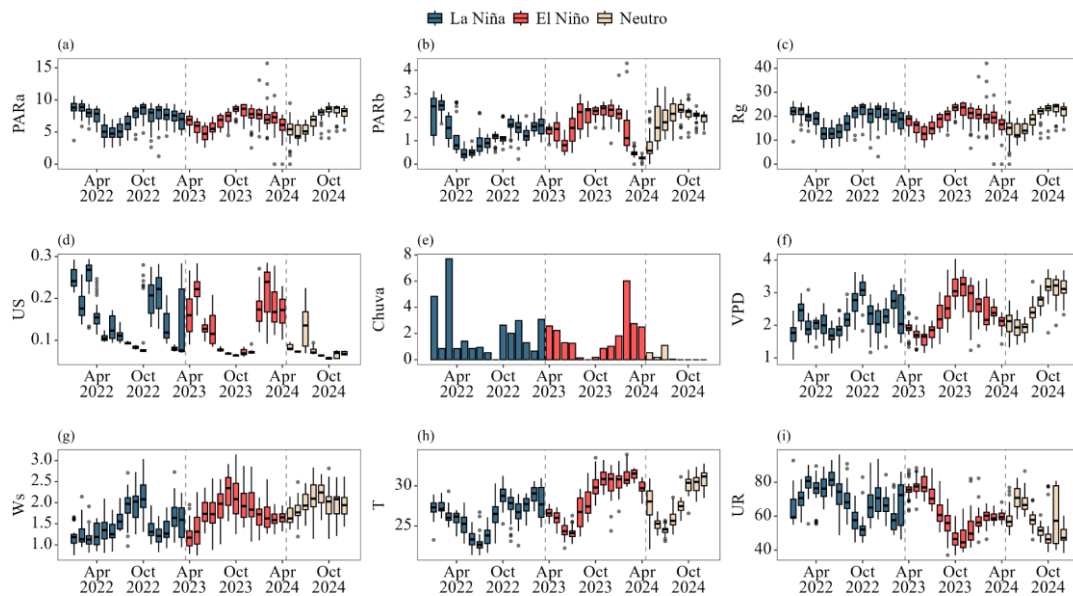


Figura 3. Condições ambientais mensais durante o período de estudo, para os períodos de La Niña (LN), El Niño (EN), Neutro (NE) em 2022–2024, no cultivo de cactos na região semiárida brasileira. Os gráficos mostram as condições locais da (a) PAR_a - radiação fotossinteticamente ativa acima do dossel — PAR_a ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); (b) radiação fotossinteticamente ativa medida abaixo do dossel — PAR_b ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); (c) radiação solar global — R_g ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); (d) Umidade do solo — US ($m^3\ m^{-3}$); (e) chuva — (mm); (f) déficit de pressão de vapor — VPD (kPa); (g) velocidade do vento — W_s ($m\ s^{-1}$); (h) temperatura do ar — T ($^{\circ}C$); (i) umidade relativa — UR (%). As linhas pontilhadas indicam os limites dos anos avaliados.

No PAR_a os valores médios observados foram de 7,15 MJ m⁻² dia⁻¹, 6,84 MJ m⁻² dia⁻¹ e 6,79 MJ m⁻² dia⁻¹, respectivamente para LN, EN e NE (Figura 3a). O Rg médio para os três períodos foi de 18,6 MJ m⁻² dia⁻¹ (Figura 3c). A umidade do solo (US) no LN variou de 0,08 a 0,25 m³ m⁻³ com os maiores resultados em janeiro e fevereiro de 2022, no EN a variação foi de 0,06 a 0,22 m³ m⁻³, com maiores valores no mês de maio de 2023 e no NE foi de 0,07 a 0,13 m³ m⁻³ com maior valor no mês de julho de 2024 (Figura 3d).

A chuva foi maior no período de La Niña (LN) com 911,1 mm, seguido por El Niño (EN) com 683,3 mm e o Neutro (NE) com 57,2 mm (Figura 3e). No déficit de pressão de vapor (VPD), os resultados durante a LN, EN e NE foram em média 2,2; 2,3 e 2,6 kPa, respectivamente (Figura 3f). A velocidade do vento (W_s) em média na LN foi de 1,5 m s⁻¹, no EN foi de 1,8 m s⁻¹ e no NE o valor foi de 2,0 m s⁻¹ (Figura 3g). A temperatura média do ar (T) em cada período foi de 26,3; 28,4 e 27,7 °C, para LN, EN e NE, respectivamente (Figura 3h). A média da umidade relativa foi maior no LN com 68,9%, para o EN foi de 61,8% e no NE foi de 58,2% (Figura 3i). A Tabela 3 informa os valores acumulados e médios das variáveis estudadas durante os períodos do ENOS e os respectivos dias de duração. Em média, os valores acumulados obtidos das variáveis analisadas foram de 455 dias para o LN, 396 dias EN e 245 dias NE, que sintetizam de forma comparativa os resultados.

Tabela 3. Valores acumulados e médios das variáveis, durante os períodos de ENOS e os dias de duração.

Variáveis	Dias por período		
	455	396	245
	LN	EN	NE
NEE (g C m ⁻² dia ⁻¹)	-498,04	-911,82	-244,18
Reco (g C m ⁻² dia ⁻¹)	1211,85	1028,45	110,55
GPP (g C m ⁻² dia ⁻¹)	1704,47	1970,75	354,72
PARa (μmol m ⁻² s ⁻¹)	7,15	6,84	6,79
Rg (W m ⁻²)	18,63	18,54	18,66
Rr (W m ⁻²)	-2,91	-3,03	-2,93
Rs (W m ⁻²)	-39,35	-40,42	-40,47
Ra (W m ⁻²)	34,76	35,54	34,60
Rn (W m ⁻²)	11,13	10,63	9,86
LE (W m ⁻²)	4,90	6,75	1,64
H (W m ⁻²)	4,75	6,57	8,22
G (W m ⁻²)	-0,11	-0,05	0,19
US (m ³ m ⁻³)	0,15	0,13	0,08
CHUVA (mm)	911,10	683,26	57,15
VPD (kPa)	2,21	2,35	2,57
Ws (m s ⁻¹)	1,48	1,76	1,96

T (°C)	26,35	28,43	27,74
UR (%)	68,85	61,84	58,23

La Niña — LN; El Niño — EN; Neutro — NE; Troca líquida de CO₂ do ecossistema — NEE; Respiração do ecossistema — Reco; Produtividade primária bruta — GPP; Radiação fotossintética ativa acima do dossel — PARa; Radiação solar global — Rg; Radiação de onda curta ascendente — Rr; Radiação de onda longa ascendente — Rs; Radiação de onda longa descendente — Ra; Saldo radiação — Rn; Fluxo de calor latente — LE; Fluxo de calor sensível — H; Fluxo de calor do solo — G; Umidade do solo — US; Déficit de vapor de pressão — VPD; Velocidade do vento — Ws; Temperatura — T; Umidade relativa do ar — UR.

Na Tabela 3 observa-se que o NEE apresentou valores mais negativos no período de EN, seguido por LN e a fase NE com média de -911,82, -498,04 e -244,18 g C m⁻² dia⁻¹, respectivamente. O maior valor de Reco foi observado no LN com 1211,85 g C m⁻² dia⁻¹, já para o GPP o maior observado foi durante o LN com 1970,75 g C m⁻² dia⁻¹. O maior volume de chuva foi observado no período do LN com 911,10 mm, já no EN o volume de chuva foi 683,26 mm. A temperatura média foi maior no EN com 28,43 °C.

3.2. Variação sazonal e temporal no balanço de carbono, energia e radiação

No presente estudo, a Figura 4 demonstra os períodos de La Niña (LN), El Niño (EN) e Neutro (NE), expondo os valores médios de trocas de radiação, energia e carbono (C) em cultivo de palma forrageira [*O. stricta* (Haw). Haw.]. Na Figura 4a observa-se que o comportamento da troca líquida de CO₂ (NEE) foi semelhante nos três períodos, com os maiores valores de absorção de CO₂ ocorrem na faixa das 10:00 às 13:00, com os valores de -7,75; -6,07 e -3,53 μmol m⁻² s⁻¹, para LN, EN e NE, respectivamente.

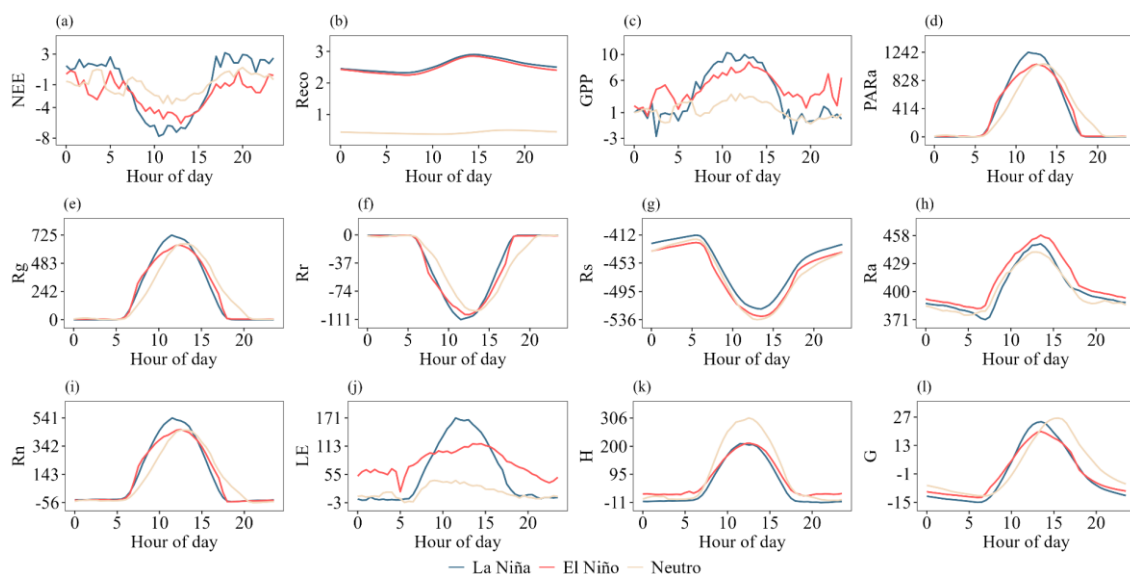


Figura 4. Ciclo diurno de troca de carbono, balanço de energia e radiação horária durante os períodos de La Niña (LN) El Niño (EN) e Neutro (NE). (a) Troca líquida de CO₂ do ecossistema — NEE; (b) respiração do ecossistema — Reco; (c) produtividade primária bruta — GPP; (d) radiação fotossintética ativa — PARa; são expressas em $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. (e) radiação solar global — Rg; radiação de onda curta ascendente — Rr; (g) radiação de onda longa ascendente — Rs; (h) radiação de onda longa descendente — Ra; (i) Saldo radiação — Rn; (j) fluxo de calor latente — LE; (k) fluxo de calor sensível — H; (l) fluxo de calor do solo — G. Todas expressas em W m^{-2} . Valores negativos no painel (a) indicam absorção de carbono, enquanto valores positivos nos painéis (b) e (c) indicam liberação de carbono pelo ecossistema.

Na Figura 4b, a respiração do ecossistema (Reco) apresentou valores próximos para LN e EN, com 2,90 e 2,85 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente. A produtividade primária bruta (GPP) demonstrou variações ao longo dos períodos (Figura 4c), onde na LN o valor máximo foi 10,29 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ às 10:00, e durante o EN o valor máximo foi de 8,85 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ às 13:00, e menor valor (0,45 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) às 13:30. A Figura 4d mostra a radiação fotossintética ativa (PARa) entre os três períodos, com EN de menor valor (1065,99 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), e 14,2% menor que o LN.

A radiação solar global em seu valor máximo foi maior no período de LN, sendo 13,39 e 11,54% que a fase de EN e NE, respectivamente (Figura 4e). A radiação de onda curta ascendente (Rr) apresentou valor média de -35,12 W m^{-2} (Figura 4f). Já na radiação de onda longa ascendente (Rs), o valor foi maior na fase NE, com média de -468,40 W m^{-2} (Figura 4g). Os resultados na radiação de onda longa descendente (Ra) não apresentam diferença observáveis, sendo em média 402,33; 411,39 e 400,42 W m^{-2} para LN, EN e NE, respectivamente (Figura 4h).

Na Figura 4i, mostra o saldo de radiação (Rn) durante o período estudado. O valor máximo observado foi no período de LN (540,86 W m^{-2}) às 11:30. O valor médio de fluxo

de calor latente (LE) foi maior no EN com $78,07 \text{ W m}^{-2}$, com valor máximo de $118,03 \text{ W m}^{-2}$ às 14:30 (Figura 4j). O fluxo de calor sensível (H) foi em média maior na fase NE com $95,12 \text{ W m}^{-2}$. Além disso, observou-se uma variação acentuada no fluxo de calor no solo (G), com maior valor na fase NE ($26,51 \text{ W m}^{-2}$) (Figura 4l).

Na Figura 5, a R_g apresentou em média os valores máximo e mínimo de 23,14 e $12,55 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, em outubro de 2023 (período de EN) e junho de 2022 (período de LN), respectivamente (Figura 5a). No período de LN a R_r apresentou valores maiores (mais negativo) nos meses de janeiro e fevereiro de 2022, no EN em outubro e novembro de 2023 e na fase NE em outubro e novembro de 2024. A média da R_r durante toda fase de LN, EN e NE foi de -2,92; -3,03 e $-2,93 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, respectivamente (Figura 5b). Em média os valores para R_s foram de -39,3; -40,4 e $-40,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para LN, EN e NE, respectivamente (Figura 5c). Os maiores valores de R_a foram observados com $35,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (Figura 5d).

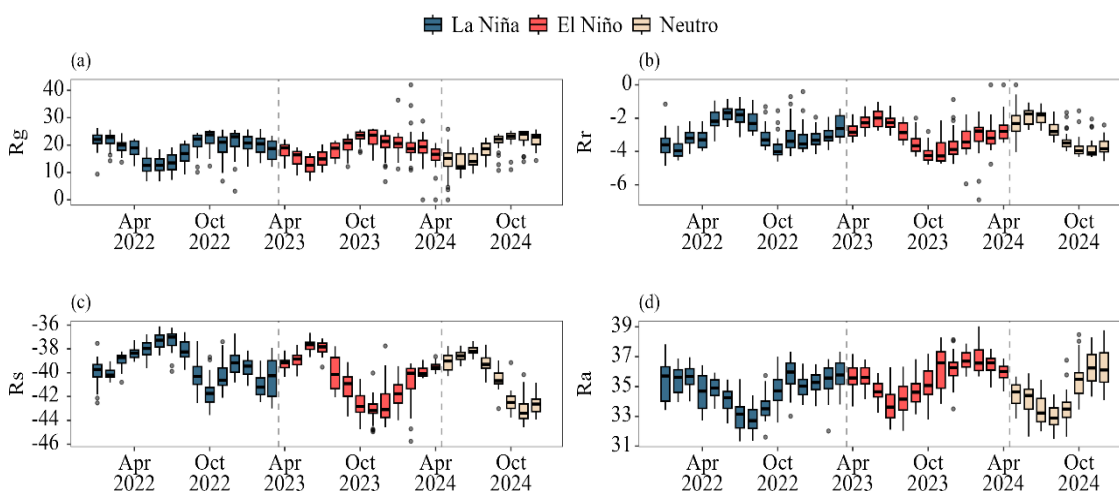


Figura 5. Variação temporal do balanço de radiação no cultivo do cacto *Opuntia* na região semiárida brasileira. (a) radiação solar global — R_g ; (b) radiação de onda curta ascendente — R_r ; (c) radiação de onda longa ascendente — R_s ; (d) radiação de onda longa descendente — R_a . Todas as variáveis foram medidas em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. As linhas pontilhadas indicam os limites dos anos.

A Figura 6 mostra os valores médios mensais do balanço de energia para as fases LN, EN e NE, nos anos de 2022 a 2024. Na LN o maior valor observado para R_n ocorreu em dezembro de 2022 ($13,58 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Em 2024, os maiores valores de R_n ocorreram em fevereiro ($13,16 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) para o EN, e em novembro ($12,18 \text{ MJ m}^{-2}$

dia^{-1}) na fase NE (Figura 6a). No período de LN, os menores valores para o LE observados foram nos meses de julho-setembro de 2022 ($0,74 - 1,71 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), no EN de agosto-dezembro de 2023 ($0,51 - 1,27 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e no NE em junho-dezembro de 2024 ($0,41 - 2,31 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Os valores médios para H foram $4,75 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, $6,57 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, $8,22 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, para LN, EN e NE respectivamente (Figura 6c). O G apresentou valores médios de $-0,11 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para LN, $-0,05 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para EN e $0,19 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para o NE (Figura 6d).

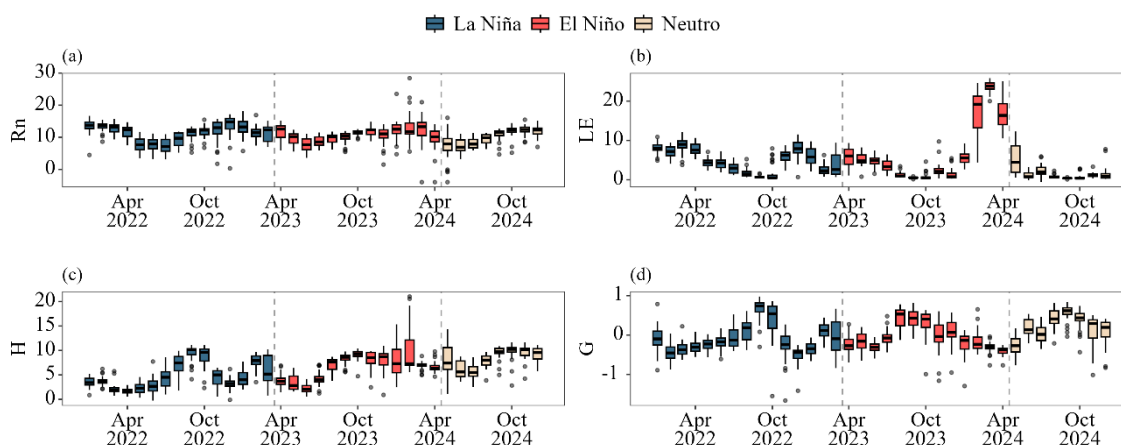


Figura 6. Variação sazonal da (a) radiação líquida — R_n ; (b) fluxo de calor latente — LE ; (c) fluxo de calor sensível — H ; e (d) fluxo de calor no solo — G ; durante o período de 2021 a 2024 no cultivo de cacto *Opuntia stricta* na região do Semiárido brasileira. Todas as variáveis foram medidas em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. As retas pontilhadas indicam os limites dos anos.

A Figura 7 mostra a variação mensal do balanço de carbono e PAR_a absorvida pela palma forrageira no período de LN, EN e NE nos anos de 2022 a 2024. Observou-se que a palma forrageira teve um comportamento como sumidouro de carbono durante todos os meses nos três períodos, obtendo o valor maior (mais negativo) para o NEE no mês de agosto de 2022 para o LN ($-7,08 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), em março de 2024 para EN ($-13,92 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e maio de 2024 para NE ($-6,62 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) (Figura 7a). A GPP apresentou maiores valores no mês de maio de 2023 durante o EN (Figura 7b), o mesmo comportamento ocorreu na Reco durante o mesmo período (Figura 7c). Em média, o menor valor da PAR_a foi em junho durante os três anos para o LN, EN e NE, sendo os valores de $4,79$; $4,79 \text{ MJ}$ e $4,93 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, respectivamente (Figura 7d).

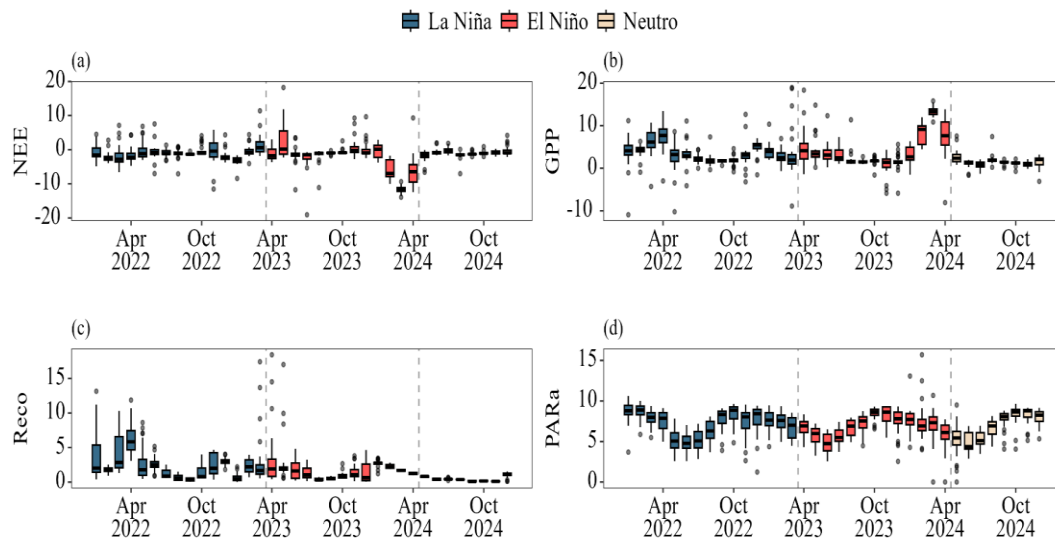


Figura 7. Variação mensal do balanço de carbono para (a) troca líquida de CO₂ no ecossistema — NEE; (b) produtividade primária bruta — GPP; (c) respiração do ecossistema — Reco; (d) radiação fotossinteticamente ativa absorvida — PAR_a, no cultivo de cacto *Opuntia* durante 2022–2024 na região semiárida brasileira. As retas pontilhadas indicam os limites dos anos. Nota: NEE, GPP, Reco em g C m⁻² dia⁻¹ e PAR_a em MJ m⁻² dia⁻¹.

3.3. Fechamento do balanço energético

A Figura 8 mostra o fechamento do balanço de energia (EBC) durante o período de 2022 a 2024, com dados medidos a cada meia hora pela convecção de vórtices. Os resultados mostram coeficiente angular de 0,60, dessa forma, indicando uma perda de energia disponível em 40% por processos não quantificados, como armazenamento do calor no dossel e o uso de métodos que forçam o fechamento do balanço, por exemplo a razão de Bowen. Além disso, ressalta-se que valores próximos de 1 indicam bom fechamento da energia.

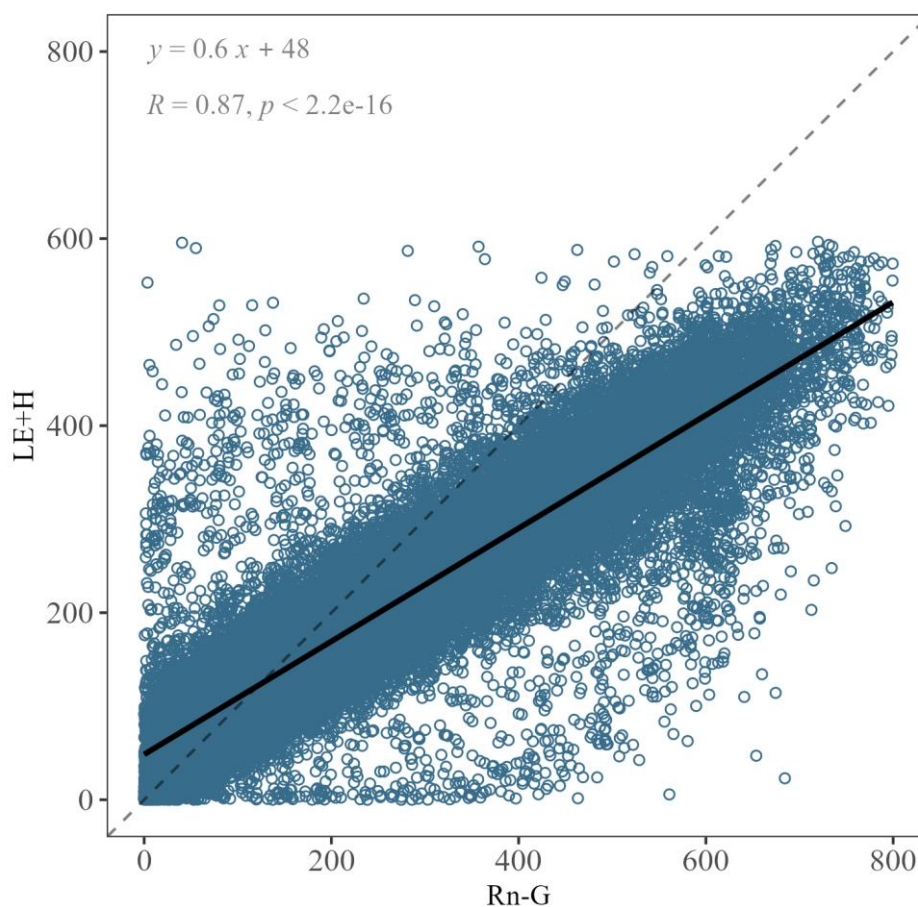


Figura 8. Relações entre energia disponível ($R_n - G$) e fluxos turbulentos ($LE + H$) para medições de meia hora de 2022 a 2024 no cultivo de cactos na região semiárida brasileira. A linha tracejada cinza é a linha 1:1, e a linha contínua preta é a linha ajustada pela regressão linear.

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos no particionamento dos fluxos de energia e radiação, assim como a fração de PAR interceptada no cultivo da palma. Observou-se que para a razão entre R_r/R_g , onde esse albedo o valor foi de 0,16 nos três anos. Em relação à razão de R_n/R_g teve uma média anual de 0,57 com variação na faixa (0,56 – 0,60). A razão PAR/R_g apresentou média anual de 0,37, variando de 0,37 – 0,39. A razão LE/R_n mostrou valor médio anual de 0,45. Na razão H/R_n , a média por ano foi de 0,58, e para a razão G/R_n os valores observados foram nulos. Isso pode ser explicado pelo fato que toda energia que o solo ganhou não ficou armazenada.

Tabela 4 Partições de radiação, energia e radiação fotossintética ativa durante os anos de 2022–2024, no cultivo de *Opuntia* na região semiárida brasileira.

Ano	fIPAR	Rr/Rg	Rn/Rg	PAR/Rg	LE/Rn	H/Rn	G/Rn
2022	0,82	0,16	0,60	0,39	0,46	0,41	0,00
2023	0,75	0,16	0,56	0,37	0,30	0,57	0,00
2024	0,76	0,16	0,56	0,37	0,60	0,77	0,00
Média anual	0,78	0,16	0,57	0,37	0,45	0,58	0,00

Radiação de onda curta ascendente – Rr; Radiação solar global – Rg; Radiação líquida – Rn; Radiação fotossintética ativa – PAR; Fração de PAR interceptada – fIPAR; fluxo de calor latente – LE; fluxo de calor sensível – H e fluxo de calor do solo – G.

3.4. Respostas de rendimento biomassa e produtividade da água da cultura.

Na Tabela 4, nossos resultados mostraram um maior valor de biomassa seca no ano de 2023 (35,08 Mg ha⁻¹). Nesse mesmo ano, o índice de área do cladódio (CAI) apresentou o maior valor, com 1,58 m² m⁻². Já a TCA (taxa de crescimento absoluto), TCR (taxa de crescimento relativo) e TAL (taxa de assimilação líquida) foram maiores no ano de 2022 com 0,0203 Mg ha⁻¹ °Cdia⁻¹, 0,0011 Mg ha⁻¹ °Cdia⁻¹, 0,0249 Mg ha⁻¹ °Cdia⁻¹, respectivamente. Em relação a ACE (área do cladódio específica) o maior valor observado foi 0,0599 ha Mg⁻¹ no ano de 2024 e na WPC_{ET} (produtividade da água da cultura) o maior valor foi de 0,0685 Mg ha⁻¹ mm⁻¹ no ano de 2023.

Tabela 5. Biomassa, índice morfofisiológico e taxa de crescimento e eficiência de água no cultivo de cactos no Semiárido brasileiro.

Ano	Biomassa seca Mg ha ⁻¹	CAI m ² m ⁻²	TCA Mg ha ⁻¹ °Cdia ⁻¹	TCR Mg ha ⁻¹ °Cdia ⁻¹	TAL Mg ha ⁻¹ °Cdia ⁻¹	ACE ha Mg ⁻¹	WPCET Mg ha ⁻¹ mm ⁻¹	EUR g MJ ⁻¹
2022	34,06	1,46	0,0203	0,0011	0,0249	0,0447	0,0415	3,24758
2023	35,08	1,58	0,0152	0,0008	0,0170	0,0461	0,0685	3,82328
2024	26,78	1,57	0,0093	0,0006	0,0104	0,0599	0,0263	2,98412

Índice de área do cladódio – CAI; taxa de crescimento absoluto – TCA; taxa de crescimento relativo – TCR; taxa de assimilação líquida – TAL; área de cladódio específica – ACE; produtividade da água da cultura – WPC_{ET} e eficiência da radiação – EUR.

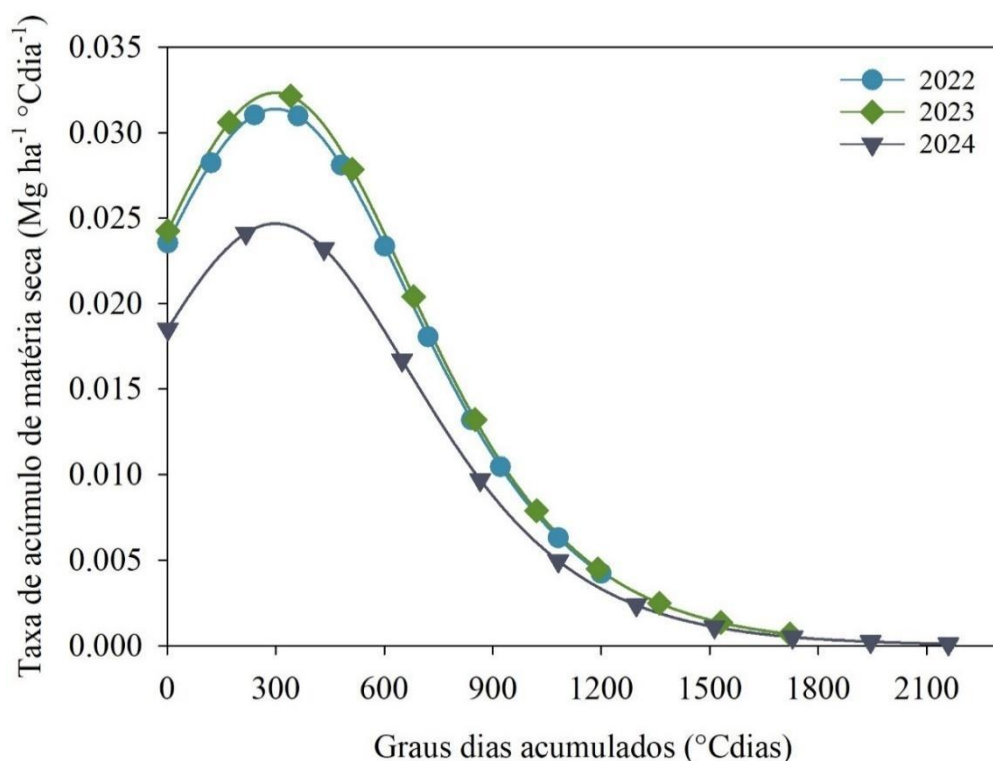


Figura 9. Taxa de acúmulo de matéria seca da *Opuntia stricta* (Haw.) Haw., durante os anos de 2022, 2023 e 2024

3.5. Análise de componentes principais

A Figura 10 mostra a análise de componentes principais (PCA) das variáveis ambientais e do cacto medidas, fornecendo indicadores sobre suas interações em um espaço multivariado. A primeira componente principal (PC1) explicou 72,05% da variância, e a segunda componente principal (PC2) explicou 27,95%. Na PCA observou-se que, G, Rg, W_s, T, VPD, H e MF e LE se correlacionarem positivamente com a PC1. Por outro lado, as variáveis restantes (ou seja, Reco, UR, PAR_a PREC, US e GPP_f, NEE, CMS e MS) demonstraram correlação negativa com PC1. O G e Rg estão na mesma direção inseridos na PC2, e a T e o VPD também na CP2, apresentando o mesmo sentido de direção, resultando em correlação positiva entre eles. Além disso, Reco, UR, PAR_a CHUVA, US e GPP_f apresentaram mesmo agrupamento, portanto, observa-se que a CHUVA e US seguem na mesma direção e sentido, e que o Reco está com direção bem próxima do NEE, já o LE não é influenciado por outro componente.

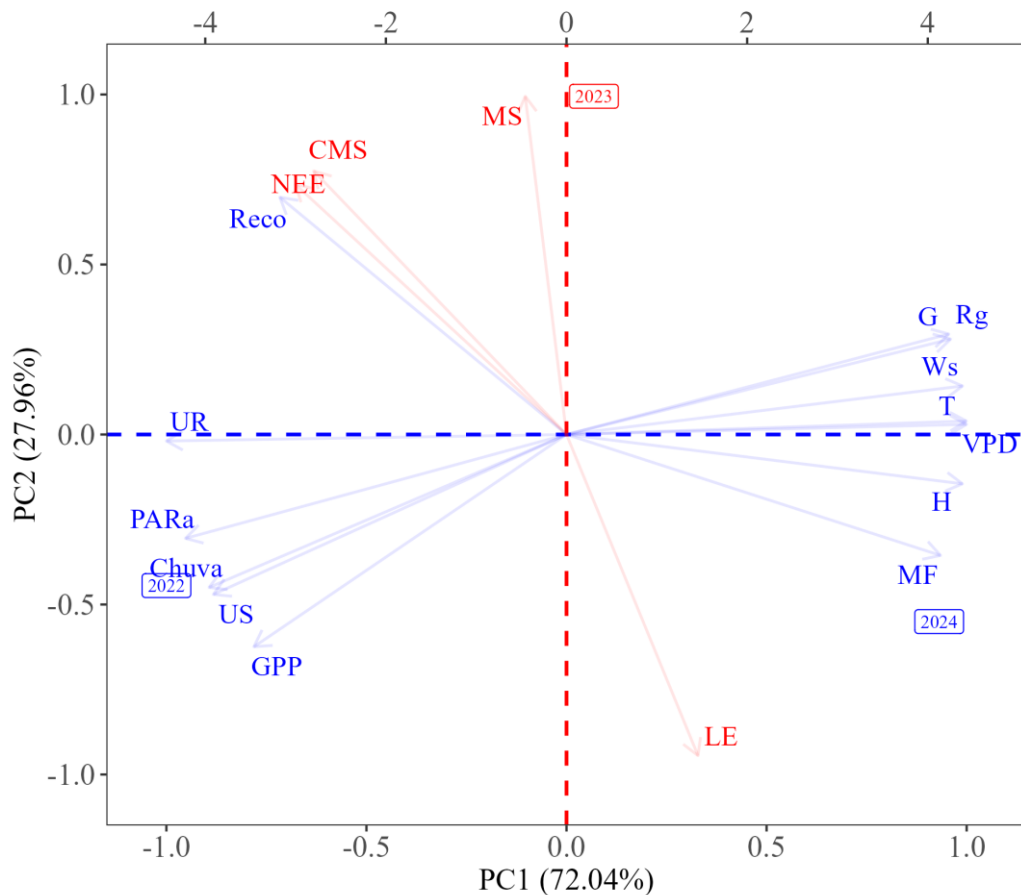


Figura 10. Análise de componentes principais (ACP) mostra a relação entre as variáveis ambientais e as da planta de cacto.

4. Discussão

4.1. Condições ambientais e fechamento do balanço energético

Durante o período experimental, houve a ocorrência dos fenômenos de La Niña, El Niño e Neutralidade. A ocorrência desses fenômenos pode causar impactos na distribuição da chuva, como, alterações na temperatura do Oceano Pacífico, além de fenômenos que podem contribuir com maiores probabilidades de períodos secos ou de enchentes (Rodrigues et al., 2017, Farias & Xavier, 2023; Vieira et al., 2022). Em relação às variáveis meteorológicas, observamos que, a chuva, temperatura do ar, umidade relativa, déficit de pressão de vapor e a radiação global estão de acordo com as características do semiárido (Marengo et al., 2017).

Nos nossos resultados ambientais e da cultura, mostraram variações de acordo com o fenômeno que estava ocorrendo no período de análise. Durante o período de La Niña, houve maiores volumes de chuva, com aumento na umidade relativa e redução da temperatura do ar, quando comparado ao período de El Niño e Neutro (Figura 3), ocasionando menores valores da evapotranspiração. No El Niño foram observados

aumentos na temperatura do ar, com menor umidade relativa e menor chuva. Porém, nesse período é possível observar que a demanda de água que entra no solo é a mesma que evapora, ou seja, há uma alta demanda atmosférica (Figura 3).

Nos eventos de La Niña, devido ao aumento no volume de chuva, ocorreram reduções na velocidade do vento e do déficit de pressão de vapor, que pode elevar a umidade do solo (Jardim et al., 2023a). A relação PAR/Rg apresentaram valores similares durante os três anos de avaliação (Tabela 4), abaixo do observado por Custódio et al. (2021), onde o valor é 0,50 no município de Petrolina e 0,44 em Brasília. Essa relação similar de PAR/Rg, pode ser explicado por resquício do efeito do La Niña sobre o El Niño ou a ocorrência de outro evento atmosférico que pode ter ocorrido como a Oscilação Decadal do Pacífico (PDO), ou a Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO). Portanto, em áreas com palma forrageira, quando ocorre a redução da Rg existe uma redução na PAR. A radiação solar é fundamental nos processos químicos, biológicos e físicos do sistema solo-planta-atmosfera, portanto um menor PAR causa um impacto negativo na eficiência fotossintética da palma (Jardim et al., 2023c; Leite et al., 2014).

4.2. Comportamento do balanço de energia e carbono nos períodos de La Niña, El Niña e Neutro e o fechamento do balanço energético

O período de El Niño que ocorreu durante o estudo não causou reduções significativas na chuva da região, como ocorreu durante o fenômeno de El Niño no ano de 2015 (Marengo et al., 2017). Segundo Alves et al. (2022) e Silva et al. (2017), o LE apresenta valores maiores quando há maior volume de chuva. Rodrigues et al. (2013) e Ajao et al. (2020) relataram que em períodos secos, o H tende ser maior que o LE, no entanto, quando ocorre maior volume de chuva, o LE aumenta. Esse fato ocorre devido à maior disponibilidade de água no solo, deste modo, faz com que mais energia seja usada para evaporação do solo e transpiração das plantas, contribuindo para maior LE e menor aquecimento acima da superfície em função da maior umidade do solo. É importante destacar que as variações da radiação solar possuem uma alta ligação com os componentes do balanço energético (Santos et al., 2024).

Segundo Jardim et al. (2023a), a radiação solar viabiliza a troca de carbono e água nos ecossistemas por meio do processo de fotossíntese. Entretanto, uma menor luz solar e pouca disponibilidade de água afetam a capacidade fotossintética das plantas. No presente estudo, no cultivo de *O. stricta*, o NEE apresentou valores negativos durante o dia e positivos durante a noite. Nesse viés, Guevara-Escobar et al. (2021) e Jardim et al.

(2023a) observaram o mesmo comportamento nos seus estudos, esse fato pode ser explicado pela presença de plantas C3 (plantas espontâneas), com pouca cobertura foliar, que com menor cobertura ainda realizam o processo de fotossíntese retirando CO₂ da atmosfera, já durante a noite ocorre apenas o processo de respiração, dessa forma, liberando CO₂ para atmosfera.

Em relação a perda de carbono para atmosfera pode estar ligada a fatores como respiração de microrganismos no solo e crescimento das raízes. O ecossistema perde carbono pela respiração do solo, por meio de microrganismos e das raízes. Além disso, esse processo pode variar de acordo com as estações do ano. Isso ficou claro no presente estudo na ocorrência de La Niña, que ocorreu maior umidade, intensificando o processo de respiração, o que elevou os valores da Reco. Devido ao aumento no volume de chuva, em relação às outras fases, Jardim et al. (2023a) ressaltaram que a palma forrageira possui raízes de menor calibre, que auxiliam na absorção de água e com umidade do solo elevada, consequentemente há uma maior Reco. O GPP foi maior mesmo no período de La Niña e principalmente no El Niño. Portanto, de acordo com essa relação, é possível observar que a palma forrageira se comportou como sumidouro de carbono, independente do período. Esse comportamento pode ser devido ao metabolismo ácido das crassuláceas (CAM) e por ser uma planta composta de muita umidade em suas estruturas.

Nesse estudo, observamos que a cacto demonstrou uma EBC de 0,60 (Figura 8), valor inferior aos encontrados por Campos et al. (2019) e Jardim et al. (2023a), com 0,70 para vegetação da Caatinga e 0,71 em *O. stricta* no semiárido brasileiro, respectivamente. Devido a palma forrageira ser uma planta CAM, a qual apresenta comportamento de fechamento estomático durante o dia, e durante a noite os mesmos são totalmente abertos, é nesse período que ocorre maior assimilação de CO₂. Portanto, podendo ocasionar erros na medição proporcionados pela interferência no fluxo de calor latente e sensível. Outro fator que pode ter contribuído é a configuração do dossel, que é ajustada de acordo com o posicionamento do cladódio juntamente com a realização da colheita.

4.3. Rendimento biomassa e eficiência do uso da água

As variáveis ambientais contribuem nas características morfológicas e na estrutura dos cladódios, como no acúmulo de massa de forragem (Araújo Júnior et al., 2021). O valor mais alto da taxa de crescimento absoluto (TCA), expressa a capacidade do acúmulo de matéria seca da planta. Em 2022, o maior volume de chuva pode ter proporcionado maior área de cladódio e, consequentemente, uma melhor eficiência fotossintética. Rocha

et al. (2017) em estudo com palma Orelha de Elefante Mexicana irrigada, relataram uma maior taxa de crescimento, proporcionando um melhor uso da água para o seu desenvolvimento, esse fato pode ser explicado devido a palma ser uma planta com metabolismo ácido das crassuláceas.

Em relação a produtividade da água da cultura, destacou-se uma maior produtividade em 2023, ano com predominância do El Niño. Esses resultados corroboram com os achados de (Santiago et al., 2022), que relataram maiores valores da eficiência do uso da água durante o El Niño, com um aumento de 51% a 89% na vegetação, devido ao estresse hídrico. Em áreas compostas por plantas CAM, é possível que esse aumento na eficiência do uso da água em El Niño, seja pelo fato de ocorrer uma maior incidência de luz e temperaturas mais altas. Nesse cenário, os solos ficam mais secos, reduzindo o fluxo de calor latente (LE) e transferência para o fluxo de calor sensível (H), sem prejudicar o processo de assimilação de carbono e elevando a eficiência do uso da água.

No presente estudo, aplicou-se a análise de componentes principais (PCA) para as variáveis que foram influenciadas pelos eventos do ENOS (Figura 10). A análise proporcionou uma inter-relação entre as variáveis, onde a PC1 explicou 72,05% e a PC2 27,95%. A PREC e a US apontaram na mesma direção, demonstrando que no ano de 2022 predominou o período de La Niña. O solo mais úmido proporcionou maiores valores de Reco, explicando sua correlação positivamente com PC2.

5. Conclusão

A pesquisa teve como intuito avaliar o comportamento do balanço de energia, radiação e carbono durante o período de três anos (2022 – 2024), com a ocorrência dos fenômenos de La Niña, El Niño e Neutro, em cultivo de palma forrageira (*Opuntia stricta*), e suas relações com a dinâmica de crescimento e a sazonalidade do regime hídrico no Semiárido brasileiro. Constatou-se que, independentemente do fenômeno a palma forrageira se comportou como sumidouro de carbono.

As trocas líquidas de CO₂ no ecossistema foram, em média, de -498,0, -911,8 e -244,2 g C m⁻² para La Niña, El Niño e Neutro, respectivamente. Esses achados demonstraram que a palma forrageira pode ser uma alternativa viável para redução dos impactos ambientais e mudanças climáticas. No entanto, mesmo com a ocorrência da chuva ter elevado a liberação de CO₂, não foi suficiente para o cultivo de cacto atuar como fonte de carbono. Vale ressaltar, que são necessários novos trabalhos nessa linha de

pesquisa, avaliando qual o comportamento desses fluxos com um maior tempo de ocorrência desses fenômenos, principalmente em épocas de eventos extremos.

6. Referências

- Ajao, A. I., Jegede, O. O., & Ayoola, M. A. (2020). Diurnal and seasonal variability of sensible and latent heat fluxes at an agricultural site in Ile-Ife, southwest Nigeria. *Theoretical and Applied Climatology*, 139(3–4), 1237–1246. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03043-z>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., De Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Alves, J. D. N., Ribeiro, A., Rody, Y. P., & Loos, R. A. (2022). Energy balance and surface decoupling factor of a pasture in the Brazilian Cerrado. *Agricultural and Forest Meteorology*, 319(May 2021). <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108912>
- Araújo Júnior, G. do N., Jardim, A. M. da R. F., Silva, M. J. da, Alves, C. P., Souza, C. A. A. de, Costa, S. A. T. da, Cunha, M. V. da, Simões, A. do N., Silva, J. R. I. da, Souza, L. S. B. de, & Silva, T. G. F. da. (2021). Growth dynamics and accumulation of forage mass of forage cactus clones as affected by meteorological variables and water regime. *European Journal of Agronomy*, 131(September). <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126375>
- Burton, C., Betts, R. A., Jones, C. D., Feldpausch, T. R., Cardoso, M., & Anderson, L. O. (2020). El Niño Driven Changes in Global Fire 2015/16. *Frontiers in Earth Science*, 8, 519668. <https://doi.org/10.3389/FEART.2020.00199/BIBTEX>
- Campos, S., Mendes, K. R., da Silva, L. L., Mutti, P. R., Medeiros, S. S., Amorim, L. B., dos Santos, C. A. C., Perez-Marin, A. M., Ramos, T. M., Marques, T. V., Lucio, P. S., Costa, G. B., Santos e Silva, C. M., & Bezerra, B. G. (2019). Closure and partitioning of the energy balance in a preserved area of a Brazilian seasonally dry tropical forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 398–412. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2019.03.018>
- Correia Filho, W. L. F., De Oliveira-Júnior, J. F., De Barros Santiago, D., De Bodas Terassi, P. M., Teodoro, P. E., De Gois, G., Blanco, C. J. C., De Almeida Souza, P. H., da Silva Costa, M., Gomes, H. B., & Dos Santos, P. J. (2019). Rainfall variability

- in the Brazilian northeast biomes and their interactions with meteorological systems and ENSO via CHELSA product. *Big Earth Data*, 3(4), 315–337. <https://doi.org/10.1080/20964471.2019.1692298>
- de Farias, A. A., & Xavier, R. A. (2023). Extreme Droughts Events in the Sucuru River Hydrographic Sub-basin, Cariri Paraibano. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 38, 1–12. <https://doi.org/10.1590/0102-77863810087>
- Duarte, M. L., & Ribeiro, A. (2023). Influence of El Niño and La Niña on the productivity of Eucalyptus plantations in different regions in Brazil. *Ciencia Florestal*, 33(1), 1–18. <https://doi.org/10.5902/1980509861334>
- Flanagan, L. B., & Flanagan, J. E. M. (2018). Seasonal controls on ecosystem-scale CO₂ and energy exchange in a Sonoran Desert characterized by the saguaro cactus (*Carnegiea gigantea*). *Oecologia*, 187(4), 977–994. <https://doi.org/10.1007/s00442-018-4187-2>
- Flores-Rentería, D., Delgado-Balbuena, J., Campuzano, E. F., & Curiel Yuste, J. (2023). Seasonal controlling factors of CO₂ exchange in a semiarid shrubland in the Chihuahuan Desert, Mexico. *Science of the Total Environment*, 858. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159918>
- Guevara-Escobar, A., González-Sosa, E., Cervantes-Jimenez, M., Suzán-Azpiri, H., Queijeiro-Bolanos, M. E., Carrillo-Ángeles, I., & Cambron-Sandoval, V. H. (2021). Machine learning estimates of eddy covariance carbon flux in a scrub in the Mexican highland. *Biogeosciences*, 18(2), 367–392. <https://doi.org/10.5194/bg-18-367-2021>
- Heusinkveld, B. G., Jacobs, A. F. G., Holtslag, A. A. M., & Berkowicz, S. M. (2004). Surface energy balance closure in an arid region: role of soil heat flux. *Agricultural and Forest Meteorology*, 122(1–2), 21–37. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2003.09.005>
- Jardim, A. M. da R. F., Morais, J. E. F. de, Souza, L. S. B. de, Marin, F. R., Moura, M. S. B. de, Morellato, L. P. C., Montenegro, A. A. de A., Ometto, J. P. H. B., de Lima, J. L. M. P., Dubeux Júnior, J. C. B., & Silva, T. G. F. da. (2023a). Sink or carbon source? how the *Opuntia* cactus agroecosystem interacts in the use of carbon, nutrients and radiation in the Brazilian semi-arid region. *Journal of Hydrology*, 625, 130121. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2023.130121>
- Jardim, A. M. R. F., Morais, J. E. F. D. ;, Souza, L. S. B. D. ;, Souza, C. A. A. D. ;, Araújo, G. D. N. ;, Bunce, J. A., Basile, A., Maniçoba, A., Ferraz Jardim, R., Florentino De Morais, J. E., Bastos De Souza, L. S., Alves De Souza, C. A., Do, G., Júnior, N. A.,

- Pereira Alves, C., Ítalo, G., Da Silva, N., Matheus, R., Leite, C., ... Freire Da Silva, T. G. (2023b). Monitoring Energy Balance, Turbulent Flux Partitioning, Evapotranspiration and Biophysical Parameters of *Nopalea cochenillifera* (Cactaceae) in the Brazilian Semi-Arid Environment. *Plants* 2023, Vol. 12, Page 2562, 12(13), 2562. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12132562>
- Jardim, M. da R. F. A., de Souza, L. S. B., Alves, C. P., Ferreira Nunes de Araújo, J., de Souza, C. A. A., Pinheiro, A. G., de Araújo, G. G. L., Campos, F. S., Tabosa, J. N., & Silva, T. G. F. da. (2023c). Intercropping forage cactus with sorghum affects the morphophysiology and phenology of forage cactus. *African Journal of Range and Forage Science*, 40(2), 129–140. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.1949749>
- José Luiz Monteiro Benicio de, M., Guilherme Henrique Gallo, S., André Jezreel Barros, B., Dan Gustavo Feitosa, B., Jesus, P., Alana Karen Mariano da, S., Regiane Souza, V., & Rafael Coll, D. (2024). Influência Dos Eventos Climáticos De El Niño E La Niña Em Uma Área De Floresta Ombrófila Aberta Na Amazônia Ocidental. *Ciência, Inovação e Tecnologia: Rumos Para o Desenvolvimento Sustentável Da Amazônia, March*, 07–18. <https://doi.org/10.35170/ss.ed.9786580261451.01>
- Leite, R. M. C., Jardim, A. M. da R. F., Júnior, G. do N. A., Alves, C. P., Silva, G. I. N. da, Rocha, A. K. P., Souza, L. S. B. de, & Silva, T. G. F. da. (2014). Revista Brasileira De Geografia. *Biblioteca.Ibge.Gov.Br*, 07, n. 1(ISSN 0034), 82. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.1.p4181-4201>
- Ludewig, W., & Shoko, C. (2024). The effect of climatic events and land-use land-cover changes on evapotranspiration in a semiarid region of South Africa. *Journal of Arid Environments*, 225, 105268. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2024.105268>
- Marengo, J. A., Torres, R. R., & Alves, L. M. (2017). Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3–4), 1189–1200. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>
- Marengo Orsini, J. A., Alves, L. M., Alvala, R. C. S., Cunha, A. P., Brito, S., & Moraes, O. L. L. (2017). Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 90(2), 1973–1985. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>
- Munyati, C. (2025). Quantifying changes in savanna rangeland grass phenology and biomass due to an El Niño event. *Journal of Arid Environments*, 227(December 2024), 105310. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105310>
- Nogueira, D. B., da Silva, A. O., Giroldo, A. B., da Silva, A. P. N., & Costa, B. R. S.

- (2023). Dry spells in a semi-arid region of Brazil and their influence on maize productivity. *Journal of Arid Environments*, 209, 104892. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2022.104892>
- Owen, N. A., Choncuhaire, Ó. N., Males, J., del Real Laborde, J. I., Rubio-Cortés, R., Griffiths, H., & Lanigan, G. (2016). Eddy covariance captures four-phase crassulacean acid metabolism (CAM) gas exchange signature in Agave. *Plant, Cell & Environment*, 39(2), 295–309. <https://doi.org/10.1111/PCE.12610>
- Pinheiro, K. M., da Silva, T. G. F., de Sousa Carvalho, H. F., Santos, J. E. O., de Moraes, J. E. F., Zolnier, S., & dos Santos, D. C. (2014). Correlações do índice de área do cladódio com características morfogênicas e produtivas da palma forrageira. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 49(12), 939–947. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014001200004>
- Ramirez-Rodrigues, M. A., Asseng, S., Fraisse, C., Stefanova, L., & Eisenkolbi, A. (2014). Tailoring wheat management to ENSO phases for increased wheat production in Paraguay. *Climate Risk Management*, 3, 24–38. <https://doi.org/10.1016/J.CRM.2014.06.001>
- Rocha, R. S., Voltolini, T. V., & Gava, C. A. T. (2017). Características produtivas e estruturais de genótipos de palma forrageira irrigada em diferentes intervalos de corte. *Archivos de Zootecnia*, 66(255), 363–371. <https://doi.org/10.21071/az.v66i255.2512>
- Rodda, S. R., Thumaty, K. C., Praveen, M. S. S., Jha, C. S., & Dadhwal, V. K. (2021). Multi-year eddy covariance measurements of net ecosystem exchange in tropical dry deciduous forest of India. *Agricultural and Forest Meteorology*, 301–302. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108351>
- Rodrigues, L. de O., Souza, W. M. de, Costa, V. S. de O., & Pereira, M. L. T. (2017). Influência dos eventos de El Niño e La Niña no regime de precipitação do Agreste de Pernambuco (Influence of El Niño and La Niña events on rainfall of Agreste Pernambuco). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10(6), 1995–2009. <https://doi.org/10.26848/RBGF.V10.6.P1995-2009>
- Rodrigues, T. R., de Paulo, S. R., Novais, J. W. Z., Curado, L. F. A., Nogueira, J. S., de Oliveira, R. G., Lobo, F. de A., & Vourlitis, G. L. (2013). Temporal Patterns of Energy Balance for a Brazilian Tropical Savanna under Contrasting Seasonal Conditions. *International Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2013/326010>

- Santiago, D. de B., Barbosa, H. A., Correia Filho, W. L. F., Oliveira-Júnior, J. F. de, Paredes-Trejo, F., & de Oliveira Buriti, C. (2022). Variability of Water Use Efficiency Associated with Climate Change in the Extreme West of Bahia. *Sustainability (Switzerland)*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/su142316004>
- Santos, W. R. dos, Jardim, A. M. da R. F., Souza, L. S. B. de, Souza, C. A. A. de, Morais, J. E. F. de, Alves, C. P., Araujo Júnior, G. do N., Silva, M. J. da, Salvador, K. R. da S., Silva, M. V. da, Morellato, L. P. C., & Silva, T. G. F. da. (2024). Can changes in land use in a semi-arid region of Brazil cause seasonal variation in energy partitioning and evapotranspiration? *Journal of Environmental Management*, 367, 121959. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.121959>
- Silva, A. C. S. L. da, Silva, J. F. B. R. da, Pinto, C. A. D., Costa, A. C. L. da, Souza, M. H. F., & Sanchez-Martinez, P. (2025). Análise do Índice de Anomalia de Chuva (IAC) e a influência do fenômeno El Niño - Oscilação Sul (ENOS) na Floresta Nacional de Caxiuanã. *Revista Brasileira de Climatologia*, 36, 384–408. <https://doi.org/10.55761/abclima.v36i21.19299>
- Silva, P. F. da, Lima, J. R. de S., Antonino, A. C. D., Souza, R., de Souza, E. S., Silva, J. R. I., & Alves, E. M. (2017). Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. *Journal of Arid Environments*, 147, 71–82. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2017.09.003>
- Silva, T. G. F. da, de Medeiros, Rômulo SátiroArraes, F. D. D., Ramos, C. M. C., Araújo Júnior, G. do N., Jardim, A. M. da R. F., Alves, C. P., Campos, F. S., da Silva, M. V., de Morais, J. E. F., de Souza, C. A. A., Siqueira e Silva, S. M., dos Santos, D. C., de Carvalho, A. A., & de Souza, L. S. B. (2023). Cactus–sorghum intercropping combined with management interventions of planting density, row orientation and nitrogen fertilisation can optimise water use in dry regions. *Science of the Total Environment*, 895(June), 165102. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165102>
- Skogberg, M., Kohonen, K. M., Lohila, A., Merbold, L., Räsänen, M., Vuorinne, I., Pellikka, P., Vesala, T., & Kübert, A. (2025). Ecosystem-scale crassulacean acid metabolism (CAM) gas exchange of a sisal (*Agave sisalana*) plantation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 381, 109435. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2024.109435>
- Vieira, L. C. de S., de Paula Silva Filho, V., Satyamurty, P., de Almeida Dantas, V., Santos, A. da S., & Francisco Bezerra das Chagas, G. (2022). Simulation of air temperature and their influence on the potential distribution of *Myracrodruon*

- urundeuva, Copernicia prunifera and Cereus jamacaru in the Caatinga. *SN Applied Sciences*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04886-w>
- Widmoser, P., & Wohlfahrt, G. (2018). Attributing the energy imbalance by concurrent lysimeter and eddy covariance evapotranspiration measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263, 287–291. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2018.09.003>
- Zeng, J., Matsunaga, T., Tan, Z. H., Saigusa, N., Shirai, T., Tang, Y., Peng, S., & Fukuda, Y. (2020). Global terrestrial carbon fluxes of 1999–2019 estimated by upscaling eddy covariance data with a random forest. *Scientific Data*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00653-5>
- Zhang, A., Jia, G., Epstein, H. E., & Xia, J. (2017). ENSO elicits opposing responses of semi-arid vegetation between Hemispheres. *Scientific Reports* 2017 7:1, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep42281>