WILMA ROBERTA DOS SANTOS COMO A MODIFICAÇÃO CONTROLADA DO USO DA TERRA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO MODIFICA A INTERAÇÃO SOLO-CAATINGA-ATMOSFERA

S A N T O S

W R

C O M O A M O D I F I C A C A O

C O N T R

WILMA ROBERTA DOS SANTOS

COMO A MODIFICAÇÃO CONTROLADA DO USO DA TERRA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO MODIFICA A INTERAÇÃO SOLO-CAATINGA-ATMOSFERA

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

Co-orientador(a): Prof. DSc. Luciana Sandra Bastos de Souza e DSc. Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação Universidade Federal Rural de Pernambuco Sistema Integrado de Bibliotecas Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S237c Santos, Wilma Roberta dos

COMO A MODIFICAÇÃO CONTROLADA DO USO DA TERRA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO MODIFICA A INTERAÇÃO SOLO-CAATINGA-ATMOSFERA / Wilma Roberta dos Santos. - 2024.

152 f.: il.

Orientador: Thieres George Freire da Silva.

Coorientador: Luciana Sandra Bastos de Souza; Alexandre Manicoba da Rosa Ferraz Jardim.

Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal , Serra Talhada, 2024.

1. Florestas secas. 2. Fluxos de energia. 3. Estoques de nutrientes. 4. Palma forrageira. 5. Serapilheira. I. Silva, Thieres George Freire da, orient. II. Jardim, Luciana Sandra Bastos de Souza; Alexandre Manicoba da Rosa Ferraz, coorient. III. Título

CDD 581.15

WILMA ROBERTA DOS SANTOS

COMO A MODIFICAÇÃO CONTROLADA DO USO DA TERRA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO MODIFICA A INTERAÇÃO SOLO-CAATINGA-ATMOSFERA

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.

APROVADO em/
Banca Examinadora
Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva – UAST/UFRPE Orientador
Dr. Mauro Guida dos Santos – UFPE
Examinador Externo
Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes – Sede/UFRPE
Examinador Externo

Aos meus pais, Valdo e Roberta por todo amor, carinho e empenho na minha formação. Aos meus irmãos Wasghithon e Suelen Roberta e aos meus sobrinhos Pedro Antony e Arthur Miguel.

Amo vocês!

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora, pelo dom da vida, por me darem força e coragem para superar as adversidades, me permitindo viver coisas que eu nunca imaginei para mim. "Até aqui nos ajudou o Senhor" 1 Samuel 7:12.

A minha família, em especial aos meus pais Roberta Maria dos Santos e Valdo Nilo dos Santos, por todo amor, amparo e orações. Aos meus irmãos Wasghinthon dos Santos e Suelen Roberta por sempre me recepcionarem a cada retorno. Aos meus sobrinhos Pedro Antony e Arthur Miguel, vocês são a minha fonte de amor mais genuíno, a titia ama vocês S2. As minhas tias, tios, primas e primos por todos os momentos compartilhados ao longo desses anos. A minha avó Maria São Pedro e Rosa Maria (*In memoriam*) por todo amor e cuidado.

Ao meu orientador, professor Thieres George Freire da Silva, por ser um entusiasta na pesquisa, por acreditar e confiar no meu potencial, pela paciência, disponibilidade em sanar minhas dúvidas não me deixando enlouquecer, compromisso e responsabilidade. Sou grata e feliz pela oportunidade .

À professora Luciana Sandra Bastos de Souza, minha coorientadora, que me acompanha desde a graduação, pela paciência, cuidado e carinho. Serei sempre grata por me acolher durante a graduação, me incentivando a percorrer os caminhos que hoje eu trilho.

A Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim, meu coorientador, carinhosamente conhecido por todos como "Xande". Obrigada pelo amparo durante esses dois anos, pela paciência em me ajudar, escutar meus aperreios e reclamações, pela confiança, por fazer a inscrição do doutorado comigo e torcer pela minha aprovação. Tu é demais, Xande .

Aos membros do Grupo de Agrometeorologia do Semiárido – GAS, em especial Marcelo Silva, Cleber Alves, Daniele Eugênio, José Edson, Álefe Xavier, Jandis Araújo, Leonardo Francelino, Ashlei Shaina, Franciê Carvalho, Lara Rosa, Pedro Paulo, Gustavo Laurindo e Valéria Torres, pelos bons momentos compartilhados, até mesmos os dias de trabalho intermináveis nessa luazinha de Serra Talhada. A Carlos André por ser um braço forte na coleta de dados.

Aos meu colegas de turma, em especial Jamiles Gonçalves, Iara Alves e Glícia Rafaela pelos momentos de estudo, trabalho e dos encontros para comer e aliviar a vida. A minha amiga Brenna Almeida por se fazer presente em minha vida, pelos bons momentos vividos em Serra Talhada tomando um sorvetinho e passeando na praça do IPSEP para jogar conversa fora, pelas inúmeras ligações que fizemos ao longo desses anos, e por sempre torcer pelo meu sucesso.

Aos colegas do PGPV, em especial Marcos Lisboa (meu conterrâneo), Lucas Pierre, Bianca Porfírio, Rodrigo Hemerson, Jheiny Carvalho e David Moreira.

Ao casal Luiz Temístocles e Maria do Socorro, juntamente com seus filhos, por terem cedido a área para implantação da pesquisa e pelo carinho e atenção em sempre nos recepcionar em sua casa.

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

A Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo incentivo à pesquisa.

Muito obrigada!

RESUMO GERAL

No Semiárido brasileiro é possível observar um mosaico de paisagens, em função das atividades antrópicas (i.e., desmatamento). Assim, tais mudanças podem promover reduções nos estoques de carbono (C) e nutrientes, deposição de serapilheira, evapotranspiração e a partição da energia disponível principalmente em regiões áridas e semiáridas. Neste sentido, objetivou-se avaliar a sazonalidade do balanço de energia, evapotranspiração, dinâmica de carbono e nutrientes, além da deposição, decomposição e ciclagem de nutrientes da serapilheira em paisagens sob diferentes níveis de intervenção antrópica no Semiárido brasileiro. Para isso, foram avaliadas seis paisagens, onde quatro estão localizadas em Floresta, Pernambuco (i.e., Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE), Caatinga desmatada (DEFA) e uma área com clone de palma forrageira 'Orelha de Elefante Mexicana' no Sertão (OEM-S), e duas paisagens de palma forrageira com os clones 'Orelha de Elefante Mexicana' (OEM-A) e o clone 'IPA-Sertânia' (IPA-A) ambas no Agreste em Pesqueira, Pernambuco. Para tanto, a determinação do balanço de energia e evapotranspiração foi realizado pelo método da razão de Bowen para as paisagens de CAA, REGE e DEFA, enquanto os estoques de C e nutrientes foram quantificados em quatro profundidades (0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm) para CAA, REGE, DEFA, OEM-S, OEM-A e IPA-A e a deposição da serapilheira foi monitorada na CAA. O fluxo de calor sensível (H) foi o fluxo dominante em ambas as áreas com 66% para CAA, 63% para REGE e 62% DEFA. O fluxo de calor latente (LE) foi equivalente a 28% da R_n para CAA, REGE e DEFA. A evapotranspiração por sua vez, respondeu em função da disponibilidade de água, sendo maior durante as estações chuvosas, com valores médios de 1,82 mm dia⁻¹ para CAA, 2,26 mm dia⁻¹ para REGE e 1,25 mm dia⁻¹ para DEFA. Já os estoques de C e P foram maiores na camada superficial do solo (0-10 cm) para REGE e IPA-A. Enquanto os estoques de K⁺ foram maiores nas profundidades de 10-20 cm para CAA, REGE, OEM-S, IPA-A e DEFA. Por outro lado, os estoques de Ca²⁺ e Mg²⁺ aumentaram nas profundidades de 30-40 cm para OEM-S e DEFA, enquanto para IPA-A o Ca²⁺ apresentou reduções nas profundidades de 10-40 cm. Os estoques de Mg²⁺ aumentaram em CAA e DEFA. Além disso, os maiores estoques de C e P foram observados para OEM-A com médias de 58,9 e 0,4 Mg ha ¹, respectivamente. Os maiores estoques de K⁺ foram observados em REGE (0,9 Mg ha⁻¹), enquanto os estoques de Ca²⁺ não apresentaram diferença entre as paisagens de CAA, REGE e OEM-A com médias de 6,5, 6,4 e 5,3 Mg ha⁻¹, respectivamente. A produção média de serapilheira foi de 864,69 kg MS ha⁻¹, com maior deposição durante a estação seca. Além disso, a fração foliar foi o principal componente, correspondendo a 61% da serapilheira total. A taxa

média de decomposição foi de 1,60 com variações 0,14 a 3,99 ao longo dos cinco anos avaliados. Assim, o presente estudo evidencia que a mudança no uso da terra promove alterações no balanço de energia, seus componentes, evapotranspiração e na dinâmica de carbono e nutrientes; enquanto a remoção da vegetação nativa implica em perdas significativas de serapilheira que atua na proteção do solo.

Palavras-chave: Florestas secas, estoques de nutrientes, fluxos de energia, serapilheira, palma forrageira.

GENERAL ABSTRACT

In the Brazilian semi-arid region, it is possible to observe a mosaic of landscapes, due to human activities (i.e., deforestation). Thus, such changes can promote reductions in carbon (C) and nutrient stocks, litter deposition, evapotranspiration, and the partition of available energy mainly in arid and semi-arid regions. In this sense, the objective was to evaluate the seasonality of the energy balance, evapotranspiration, carbon, and nutrient dynamics, in addition to the deposition, decomposition and cycling of litter nutrients in landscapes under different levels of anthropogenic intervention in the Brazilian Semiarid region. For this, six landscapes were evaluated, four of which are located in Floresta, Pernambuco (i.e., preserved Caatinga (CAA), regenerating Caatinga (REGE), deforested Caatinga (DEFA) and one landscape with a forage cactus clone 'Orelha de Elefante Mexicana' in Sertão (OEM-S), and two forage cactus landscapes with the clones 'Orelha de Elefante Mexicana' (OEM-A) and the clone 'IPA-Sertânia' (IPA-A) both in Agreste in Pesqueira, Pernambuco. To this end, the determination of the energy balance and evapotranspiration was carried out using the Bowen ratio method for the CAA, REGE and DEFA landscapes, while C and nutrient stocks were quantified at four depths (0-10, 10-20, 20-30 and 30-40 cm) for CAA, REGE, DEFA, OEM-S, OEM-A and IPA-A and litter deposition was monitored in the CAA. The sensible heat flux (H) was the dominant flux in both areas with 66% for CAA, 63% for REGE and 62% DEFA. The latent heat flux (LE) was equivalent to 28% of Rn for CAA, REGE and DEFA. Evapotranspiration, in turn, responded to water availability, being greater during the rainy seasons, with average values of 1.82 mm day ¹ for CAA, 2.26 mm day⁻¹ for REGE and 1.25 mm day⁻¹ for DEFA. C and P stocks were higher in the surface layer of the soil (0-10 cm) for REGE and IPA-A. While K+ stocks were greater at depths of 10-20 cm for CAA, REGE, OEM-S, IPA-A and DEFA. On the other hand, Ca²⁺ and Mg²⁺ stocks increased at depths of 30-40 cm for OEM-S and DEFA, while for IPA-A Ca²⁺ showed reductions at depths of 10-40 cm. Mg²⁺ stocks increased in CAA and DEFA. Furthermore, the highest C and P stocks were observed for OEM-A with averages of 58.9 and 0.4 Mg ha⁻¹, respectively. The highest K⁺ stocks were observed in REGE (0.9 Mg ha⁻¹), while Ca²⁺ stocks showed no difference between the CAA, REGE and OEM-A landscapes with averages of 6.5, 6.4 and 5.3 Mg ha⁻¹, respectively. The average litter production was 864.69 kg DM ha⁻¹, with greater deposition during the dry season. Furthermore, the leaf fraction was the main component, corresponding to 61% of the total litter. The average decomposition rate was 1.60 with variations from 0.14 to 3.99 over the five years evaluated. Thus, the present study shows that changes in land use promote changes in the energy balance, its components,

evapotranspiration and carbon and nutrient dynamics; while the removal of native vegetation implies significant losses of litter, which acts to protect the soil.

Keywords: Dry forests, nutrient stocks, energy flows, litterfall, forage cactus.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 – VARIAÇÃO SAZONAL DOS FLUXOS DE ENERGIA E
EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM DIFERENTES PAISAGENS COM MUDANÇA DO
USO DA TERRA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO
Figura 1. Localização da área de estudo e dos três sítios experimentais: Caatinga preservada
(CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA)21
Figura 2. Variabilidade sazonal das variáveis meteorológicas: (A) radiação solar global $(R_g,$
$MJ \; m^{\text{-}2} \; dia^{\text{-}1}), (B) \; temperatura \; do \; ar \; (Tair, ^{\text{o}}C), (C) \; umidade \; relativa \; do \; ar \; (RH, \%), (D) \; d\'eficit$
de pressão de vapor (VPD , kPa), (E) chuva (mm) e (F) umidade volumétrica do solo (θ , cm^3
cm ⁻³) de 2020 a 2022 para CAA, REGE e DEFA
Figura 3. Comportamento do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) nos sítios
experimentais de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área
desmatada (DEFA) no munícipio de Floresta, Pernambuco, Brasil, durante o período de
Setembro de 2020 a Outubro de 2022
Figura 4. Ciclo médio diários dos fluxos de energia durante a estação seca (A, B e C), transição
seca-chuvosa (D, E e F), chuvosa-seca (G, H e I) e chuvosa (J, L e M) para CAA (A, D, G e J),
REGE (B, E, H e L) e DEFA (C, F, I e M)
Figura 5 . Ciclo horário dos fluxos de energia: radiação líquida (R_n) , fluxo de calor latente (LE) ,
fluxo de calor sensível (H) , fluxo de calor no solo (G) , razão de Bowen (β) e déficit de pressão
de vapor (VPD) para as áreas de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE)
e área desmatada (DEFA)
Figura 6. Boxplots mensais da radiação líquida (R_n) , fluxo de calor sensível (H) , fluxo de calor
latente (LE), fluxo de calor no solo (G) e evapotranspiração (ET) para os sítios experimentais
de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA)
entre os anos de 2020 e 2022
Figura 7. Boxplots entre estações para a radiação líquida (R_n) , fluxo de calor sensível (H) , fluxo
de calor latente (LE), fluxo de calor no solo (G) e evapotranspiração (ET) dos sítios
experimentais de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área
desmatada (DEFA) entre os anos de 2020 e 2022
Figura 8. Análise de componentes principais (PCA) das variáveis micrometeorológicas
(Umidade relativa do ar $-$ RH; temperatura do ar $-$ (Tair), déficit de pressão de vapor $ VPD$ e
evapotranspiração – ET); do balanço de energia (R_n – radiação líquida; fluxo de calor latente –

volumétrica do solo (θ) e NDVI em função dos regimes hídricos (seco e chuvoso) e suas transições (seco-chuvoso e chuvoso-seco) para as áreas de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA)
Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA)
CAPÍTULO 2 – DINÂMICA DE CARBONO E NUTRIENTES EM PAISAGENS COM DIFERENTES NÍVEIS DE INTERVENÇÃO ANTRÓPICA NO SEMIÁRIDO
DIFERENTES NÍVEIS DE INTERVENÇÃO ANTRÓPICA NO SEMIÁRIDO
DIFERENTES NÍVEIS DE INTERVENÇÃO ANTRÓPICA NO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO
Figura 1. Localização das áreas experimentais com diferentes paisagens com mudança no uso
da terra: Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE), Caatinga desmatada
(DEFA) e clone de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana - Sertão (O EM-S)
localizadas no município de Floresta, Pernambuco e clones de palma forrageira Orelha de
Elefante Mexicana – Agreste e IPA-Sertânia – Agreste (IPA-A) localizadas no município de
Pesqueira, Pernambuco
Figura 2. Estoques de carbono (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D), magnésio (E) e sódio
(F) para os diferentes tipos de paisagens: Caatinga preservada (CAA), Caatinga desmatada
(DEFA), área com palma forrageira clone IPA-Sertânia – Agreste (IPA-A), Orelha de Elefante
Mexicana – Agreste (OEM-A), Orelha de Elefante Mexicana – Sertão (OEM-S) e Caatinga em
regeneração (REGE)81
Figura 3. Distribuição vertical dos estoques de carbono (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio
(D), magnésio (E) e sódio (F) para os diferentes tipos de paisagem: Caatinga preservada (CAA),
Caatinga desmatada (DEFA), área com palma forrageira clone IPA-Sertânia - Agreste (IPA-
A), Orelha de Elefante Mexicana – Agreste (OEM-A), Orelha de Elefante Mexicana – Sertão
(OEM-S) e Caatinga em regeneração (REGE)83
CAPÍTULO 3 – DEPOSIÇÃO, SAZONALIDADE E DETERMINANTES
CLIMÁTICOS NA PRODUÇÃO DE SERAPILHEIRA E SEUS COMPONENTES EM
UMA FLORESTA TROPICAL SECA: UMA OBSERVAÇÃO DE CINCO ANOS
Figura 1. Localização da área experimental em uma área de Caatinga preservada, no município
de Floresta, Pernambuco, Sertão Central do Brasil
Figura 2. Ilustração esquemática dos coletores e da deposição de serapilheira e suas frações
presentes nos coletores

Figura 3. Temperatura média do ar (Tair, °C), umidade relativa do ar (UR, %), radiação solar
global (Rg, MJ m $^{\text{-}2}$), umidade volumétrica do solo (θ , m 3 m $^{\text{-}3}$), déficit de pressão de vapor (DPV,
kPa), velocidade do vento (VV, m s ⁻¹), chuva (mm dia ⁻¹) e evapotranspiração de referência
(ET ₀ , mm dia ⁻¹) para o período de janeiro de 2018 a dezembro de 2022, no município de
Floresta, Pernambuco, Brasil
Figura 4. Deposição e sazonalidade da serapilheira e da chuva em um fragmento de Caatinga,
no município de Floresta, Pernambuco, Brasil, de janeiro de 2018 a dezembro de 2022112
Figura 5. Produção mensal e acumulado de serapilheira durante janeiro de 2018 a dezembro
de 2022 para (A) folhas, (B) galhos, (C) estruturas reprodutivas e (D) miscelânea para oito
espécies vegetais em um fragmento de Caatinga, no município de Floresta, Pernambuco, Sertão
Central do Brasil
Figura 6. Produção anual de serapilheira em oito espécies vegetais da Caatinga e para toda área
de Caatinga, no município de Floresta, Pernambuco, Sertão Central do Brasil117
Figura 7. Concentração média anual de nutrientes associados à queda de serapilheira suspensa
em um fragmento de Caatinga, no município de Floresta, Pernambuco, Brasil
Figura 8. Concentração média anual de nutrientes associados à queda de serapilheira no solo
em um fragmento de Caatinga, no município de Floresta, Pernambuco, Brasil
Figura 9. Análise de componentes principais (PCA) para a produção de serapilheira e as
variáveis ambientais (temperatura do ar - Tair, radiação solar global - Rg, temperatura da
superfície – Td, temperatura do solo – Tsolo, radiação líquida – RN, umidade relativa do ar –
Rhair, déficit de pressão de vapor - VPD, evapotranspiração de referência - ET0, velocidade
do vento $-$ WS e umidade volumétrica do solo $ \theta$ para as espécies Aroeira (M. urundeuva),
Baraúna (S. brasiliensis), Catingueira (C. pyramidale), Faveleira (C. quercifolius), Marmeleiro
(C. blanchetianus), Pereiro (A. pyrifolium), Umburana de cambão (C. leptophloeos) e
Umbuzeiro (S. tuberosa) em um fragmento de Caatinga, no município de Floresta, Pernambuco,
Brasil

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 – VARIAÇÃO SAZONAL DOS FLUXOS DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM DIFERENTES PAISAGENS COM MUDANÇA DO USO DA TERRA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Tabela 1. Normal climatológica (1961-1990) para os elementos meteorológicos: Temperatura
m ínima (T_N , $^{\circ}$ C), temperatura média (T air, $^{\circ}$ C), temperatura máxima (T_X , $^{\circ}$ C), umidade relativa
(UR, %), chuva (mm), radiação global incidente (R_g , MJ m ⁻² dia ⁻¹) e evapotranspiração de
referência (ETO, mm) no município de Floresta, PE, no sertão Central do Brasil. Fonte: INMET.
Tabela 2. Variáveis analisadas e instrumentos instalados nas torres micrometeorológicas
presentes nas áreas de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área
desmatada (DEFA) presentes na Fazenda Algodões, , munícipio de Floresta, Pernambuco,
Brasil21
Tabela 3. Resumo dos erros em que o balanço de energia de superfície pelo método da razão
de Bowen (BERB) falha, segundo critérios de Perez et al. (1999)
Tabela 4. Delimitação das estações com base no número de eventos e lâminas de chuva
acumulada (mm).
Tabela 5. Temperatura (T, °C), umidade relativa do ar (RH, %) e déficit de pressão de vapor
d'água (VPD, kPa) médio (M), máximo (X) e mínimo (N) em função dos regimes hídricos para
os sítios de Caatinga (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA),
situados no município de Floresta, região central do estado de Pernambuco, Sertão Central do
Brasil
Tabela 6 . Densidade dos fluxos de energia diurnos (R_n – saldo de radiação, G – fluxo de calor
no solo, LE – fluxo de calor latente e H – fluxo de calor sensível, MJm^{-2} dia $^{-1}$) em função dos
regimes hídricos, para os sítios de Caatinga (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área
desmatada (DEFA), situados no munícipio de Floresta, região central do estado de Pernambuco,
Sertão central do Brasil
Tabela 7 . Partição da radiação líquida dissipada em fluxo de calor latente (LE/R_n , MJ m ⁻² dia
¹), fluxo de calor sensível (H/R_n , MJ m ⁻² dia ⁻¹) e fluxo de calor no solo (G/R_n , MJ m ⁻² dia ⁻¹) para
os sítios de Caatinga (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA),
situados no munícipio de Floresta, região central do estado de Pernambuco, Sertão central do
Brasil 37

Tabela 8. Umidade volumétrica do solo (θ) , evapotranspiração (ET) e razão de Bowen (β) em
função dos regimes hídricos, para os sítios de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em
regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA), situados no munícipio de Floresta, região
central do estado de Pernambuco, Sertão central do Brasil
CARÉTULO A DINÂMICA DE CARRONO E NUEDIENTES EM DAIGACENIS COM
CAPÍTULO 2 – DINÂMICA DE CARBONO E NUTRIENTES EM PAISAGENS COM
DIFERENTES NÍVEIS DE INTERVENÇÃO ANTRÓPICA NO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO
Tabela 1 . Características físicas do solo em áreas de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em
regeneração (REGE), clone de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana no Sertão (OEM-
S) e área desmatada (DEFA) localizadas em Floresta, Pernambuco, Brasil e clones de palma
forrageira Orelha de Elefante Mexicana no Agreste (OEM-A) e IPA Sertânia no Agreste (IPA-
A) localizadas em Pesqueira, Pernambuco, Brasil
Tabela 2 . Características química do solo (carbono orgânico total – COT, fósforo – P, potássio
$-K^{\scriptscriptstyle +},c\'{a}lcio-Ca^{2\scriptscriptstyle +},magn\'{e}sio-Mg^{2\scriptscriptstyle +},s\'{o}dio-Na^{\scriptscriptstyle +}esomadebases-SB)nascamadasde0\text{-}40$
cm em áreas de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE), Orelha de
Elefante Mexicana – Sertão (OEM-S), e Caatinga desmatada (DEFA) em Floresta,
Pernambuco, Brasil e Orelha de Elefante Mexicana – Agreste (OEM-A), IPA-Sertânia –
Agreste (IPA-A) em Pesqueira, Pernambuco, Brasil
Tabela 3 . Estoques de C, P, K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ e Na ⁺ nas camadas de 0-40 cm em áreas de Caatinga
preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE), Caatinga desmatada (DEFA), Orelha de
Elefante Mexicana – Sertão (OEM-S) em Floresta, Pernambuco, Brasil e clone IPA-Sertânia –
Agreste (IPA-A) e Orelha de Elefante mexicana – Agreste (OEM-A) em Pesqueira,
Pernambuco, Brasil
$\textbf{Tabela 4}. \ Estoques \ de \ C, \ P, \ K^+, \ Ca^{2^+}, \ Mg^{2^+} \ e \ Na^+ \ em \ diferentes \ épocas \ do \ ano \ em \ áreas \ de$
Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE), Orelha de Elefante Mexicana
– Sertão (OEM-S) e Caatinga desmatada (DEFA) em Floresta, Pernambuco, Brasil e clones de
Orelha de Elefante Mexicana – Agreste (OEM-A) e IPA-Sertânia – Agreste (IPA-A) em
Pesqueira, Pernambuco, Brasil
$\textbf{Tabela 5}.\ Caracter\'(sticas\ qu\'(mica\ do\ solo\ (carbono\ org\^anico\ total-COT,\ f\'osforo-P,\ pot\'assio$
$-\ K^{\scriptscriptstyle +},\ c\'alcio-Ca^{\scriptscriptstyle 2+},\ magn\'esio-Mg^{\scriptscriptstyle 2+},\ s\'odio-Na^{\scriptscriptstyle +}\ e\ soma\ de\ bases-SB)\ em\ diferentes\ \'epocas$
do ano para Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE), Orelha de Elefante
Mexicana – Sertão (OEM-S), e Caatinga desmatada (DEFA) em Floresta, Pernambuco, Brasil

e Orelha de Elefante Mexicana – Agreste (OEM-A), IPA-Sertânia – Agreste (IPA-A) em
Pesqueira, Pernambuco, Brasil
CAPÍTULO 3 – DEPOSIÇÃO, SAZONALIDADE E DETERMINANTES CLIMÁTICOS NA PRODUÇÃO DE SERAPILHEIRA E SEUS COMPONENTES EM UMA FLORESTA TROPICAL SECA: UMA OBSERVAÇÃO DE CINCO ANOS
Tabela 1. Normal climatológica (1961-1990) para os elementos meteorológicos no município
de Floresta, PE, no sertão Central do Brasil
Tabela 2. Caracterização físico-química do solo em área do bioma Caatinga, localizado no
município de Floresta, PE, no sertão Central do Brasil
Tabela 3. Características das espécies predominantes em um fragmento de Caatinga, utilizadas
para monitorar a deposição da serapilheira no município de Floresta, Pernambuco
Tabela 4 . Proporção da área (%) de cada uso do solo em relação a área total de serrapilheira de
2018 a 2022
Tabela 5. Cargas canônicas entre os grupos de variáveis resposta (folha, galho, órgãos
reprodutivas e miscelânia) e as variáveis explicativas (velocidade do vento - VV, radiação
líquida – Rn, temperatura do dossel – Td, Chuva, temperatura do solo – Tsolo, radiação solar
global – Rg, umidade volumétrica do solo – θ solo e índice de cobertura vegetal – ICV) para as
espécies em uma fragmento de Caatinga, no município de Floresta, Pernambuco, Brasil 118
Tabela 6. Cargas canônicas entre os grupos de variáveis resposta (folha, galho, reprodutivas e
miscelânia) e as variáveis explicativas (velocidade do vento - VV, radiação líquida - Rn,
temperatura da superfície – Td, Chuva, temperatura do solo – Tsolo, radiação solar global – Rg,
umidade volumétrica do solo – θ solo e índice de cobertura vegetal – ICV) para um fragmento
de Caatinga, no município de Floresta, Pernambuco, Brasil
Tabela 7 . Retorno de nutrientes (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹) e eficiência do uso dos nutrientes (kg ha ⁻¹ ano ⁻
¹) associados à queda da serapilheira em um fragmento de Caatinga, em Floresta, Pernambuco,
Brasil
Tabela 8 . Taxa de decomposição (k), tempo médio de retorno (1/k) e tempos de decomposição
de 50% (ln2/k) e 95% (3/k) em um fragmento de Caatinga, em Floresta, Pernambuco, Brasil.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – VARIAÇÃO SAZONAL DOS FLUXOS DE	ENERGIA E
EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM DIFERENTES PAISAGENS COM M	IUDANÇA DO
USO DA TERRA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	
1. INTRODUÇÃO	17
2. MATÉRIAIS E MÉTODOS	19
2.1. Localização e descrição da área de estudo	19
2.2. Monitoramento, aquisição dos dados micrometeorológicos e umidad	e do solo21
2.3. Estimativas do balanço de energia e evapotranspiração pelo método a	razão de Bowen
	22
2.4. Dados de NDVI	25
2.5. Análises de dados e tratamentos estatísticas	25
3. RESULTADOS	27
3.1. Condições meteorológicas	27
3.3. Umidade volumétrica do solo, evapotranspiração e razão de Bowen	41
4. DISCUSSÃO	46
4.1. Sazonalidade do balanço de energia sobre áreas de Caatinga com dif	
mudança do uso da terra	
4.2. Evapotranspiração e razão de Bowen	
5. CONCLUSÕES	
6. REFERÊNCIAS	51
CAPÍTULO 2 – DINÂMICA DE CARBONO E NUTRIENTES EM PAI	SAGENS COM
DIFERENTES NÍVEIS DE INTERVENÇÃO ANTRÓPICA NO	
BRASILEIRO	
1. INTRODUÇÃO	64
2. MATERIAIS E MÉTODOS	
2.1. Localização e caracterização da área de estudo	
2.2. Amostragem do solo e análises físico-químicas	
3. RESULTADOS	
4. DISCUSSÃO	
5. CONCLUSÕES	

CAPÍTULO 3 – DEPOSIÇÃO, SAZONALIDADE E DETERMINANTES CLIMÁTICOS NA PRODUÇÃO DE SERAPILHEIRA E SEUS COMPONENTES EM UMA FLORESTA TROPICAL SECA: UMA OBSERVAÇÃO DE CINCO ANOS

1.	IN	NTRODUÇÃO	101
2.	M	IATERIAIS E MÉTODOS	103
	2.1.	Descrição da área de estudo	103
	2.2.	Coleta de serapilheira, decomposição e análise química	105
	2.3.	Cobertura Vegetal Fracionada	107
	2.4.	Análise estatística	108
3.	R	ESULTADOS	109
	3.1.	Condições ambientais	109
	3.2.	Dinâmica sazonal da produção de serapilheira na Caatinga	110
	3.3.	Acúmulo mensal e anual de serapilheira para oito espécies da Caatinga	113
	3.4.	Deposição anula a nível de espécie	116
	3.5.	Relações entre a deposição de serapilheira para espécies da Caatinga e as var	iáveis
	amb	ientais	117
	3.6.	Decomposição, taxa de retorno e eficiência do uso de nutrientes na Caatinga	121
	3.7.	Análise de componentes principais (PCA)	124
4.	D	ISCUSSÃO	125
	4.1.	Dinâmica de deposição e sazonalidade da serapilheira na Caatinga	125
	4.2.	Deposição de serapilheira em oito espécies da Caatinga	127
	4.3.	Deposição de serapilheira e condições ambientais	130
	4.4.	Taxa de decomposição e retorno de nutrientes da serapilheira	131
	4.5.	Eficiência do uso e retorno de nutrientes	132
5.	C	ONCLUSÕES	133
6.	R	EFERÊNCIAS	134
7.	C	ONSIDERAÇÕES FINAIS	144

APRESENTAÇÃO

As mudanças no uso da terra podem promover alterações na oferta dos serviços ecossistêmicos, com impactos nas condições climáticas da superfície terrestre, modificando as trocas de calor e umidade, fluxos de gases, albedo, além de provocar reduções no armazenamento de carbono (C) e nutrientes na biomassa acima do solo. Além disso, regiões marcadas pela alta variabilidade climática, a exemplo do Semiárido, tornam-se cada vez mais vulneráveis a essas mudanças.

Neste sentido, o Semiárido brasileiro é caraterizado principalmente pelas altas temperaturas, incidência de radiação, baixos índices pluviométricos, ocorrência de déficits hídricos em maior parte do ano e, consequentemente, alta demanda atmosférica. A vegetação predominante no Semiárido brasileiro é a Caatinga, uma floresta tropical sazonalmente seca, que apresenta um aspecto heterogêneo em sua vegetação em função da alta variabilidade espaço-temporal da chuva. Nesta região, parte da vegetação nativa foi desmatada por meio de atividades antrópicas, desde o corte de madeira para lenha e carvão, como também para implantação de cultivos agrícolas e/ou pastagens. Assim, estima-se que cerca de 40% da vegetação nativa já foi modificada.

Apesar da importância da Caatinga e dos avanços em estudos que buscam compreender as implicações da mudança do uso da terra nas características do solo e nas condições atmosféricas a partir dos estoques de C, fluxos de nutrientes, deposição de serapilheira e fluxos de energia, poucos foram os estudos que associaram as variáveis micrometeorológicas as respostas no sistema solo-planta-atmosfera. A dinâmica de nutrientes, C, deposição e decomposição da serapilheira e fluxos de energia apresentam comportamento sazonal com variações a partir da disponibilidade de água no ambiente, de modo que, durante as estações chuvosas há maior disponibilidade de nutrientes no solo a partir dos processos de decomposição da serapilheira depositada no solo, principalmente durante a estação seca; e o fluxo de calor latente tende a ser maior durante a estação chuvosa, enquanto os fluxos de calor sensível e no solo tem maiores contribuições nas estações secas.

Assim, pesquisas micrometeorológicas subsidiam o entendimento das intervenções antrópicas sob diferentes paisagens e de que como essas modificações afetam desde o clima regional ao clima global, promovendo a sustentabilidade dos ecossistemas florestais, além do combate à desertificação, a degradação e a mitigação das mudanças climáticas conforme os objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) a fim de proteger o meio ambiente e o clima de acordo com as ODS 13

e 15. Adicionalmente, as variáveis meteorológicas (i.e., temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação etc.) associadas as características biológicas do ambiente podem alterar o balanço de água, fluxos de massa e calor, crescimento das plantas, deposição de serapilheira e os estoques de nutrientes. Nesta perspectiva, o propósito deste estudo é inferir que o desmatamento parcial da Caatinga não resulta em impactos significativos nas trocas de energia, evapotranspiração e variáveis microclimáticas quando comparado ao desmatamento total, de modo que as áreas podem ser utilizadas para implantação de cultivos agrícolas. A deposição, decomposição e ciclagem de nutrientes em ecossistema de Caatinga são dependentes das mudanças intra e interanuais das condições meteorológicas e representam importantes informações para o entendimento dos impactos do desmatamento da vegetação nativa sobre os avanços desses processos. Acredita-se que os estoques de carbono e nutrientes do solo em campos estabelecidos de palma forrageira exibem similaridade com as áreas de Caatinga parcialmente desmatados e em preservação, e apresentam melhores características quando comparadas a campos totalmente desnudos, logo podem ser bons indicativos para áreas que exibem avanços no processo de degradação. Assim, este estudo é composto por três capítulos, os quais objetivaram avaliar como os desmatamentos parcial e total da Caatinga modificam os padrões do balanço de energia e evapotranspiração, a dinâmica dos estoques de C e nutrientes no solo, e quais são as perdas inerentes a serapilheira e ciclagem de nutrientes do ecossistema por causa da remoção da vegetação.

- 65 CAPÍTULO 1 VARIAÇÃO SAZONAL DOS FLUXOS DE ENERGIA E
- 66 EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM DIFERENTES PAISAGENS COM MUDANÇA DO
- 67 USO DA TERRA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

68

69

RESUMO

- 70 As alterações das florestas por meio do desmatamento ou de sua substituição por áreas agrícolas 71 alteram a evapotranspiração e a partição da energia disponível. Partindo disso, este trabalho 72 investigou o balanço de energia, evapotranspiração e sua sazonalidade em paisagens sob 73 diferentes níveis de intervenções antrópicas do Semiárido brasileiro. O conjunto de dados 74 micrometeorológicos foi obtido para o período de Setembro de 2020 à Outubro de 2022, para 75 três superfícies do Semiárido: Caatinga preservada (CAA, vegetação nativa), Caatinga em 76 regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA). Aqui, utilizamos o método de balanço de 77 energia da razão de Bowen. Foram realizadas medidas de radiação solar global (R_g) , 78 temperatura do ar (Tair), umidade relativa do ar (RH), déficit de pressão de vapor (VPD), chuva 79 (mm), radiação líquida (R_n) , fluxo de calor latente (LE), calor sensível (H), calor no solo (G), 80 evapotranspiração (ET) e NDVI. O fluxo de calor sensível (H) foi o fluxo dominante em ambas 81 as áreas com 66% para CAA, 63% para REGE e 62% DEFA. O LE foi equivalente a 28% da 82 R_n para CAA, REGE e DEFA. A ET por sua vez respondeu em função da disponibilidade de 83 água, sendo maior durante as estações chuvosas, com valores médios de 1,82 mm dia ⁻¹ para CAA, 2,26 mm dia⁻¹ para REGE e 1,25 mm dia⁻¹ para DEFA. As variáveis NDVI, UR, chuva, 84 85 θ e *LE* apresentaram correlação positiva. Assim, sugere-se que mudança no uso e cobertura da 86 terra, associada à sazonalidade dos eventos de chuva, promovem alterações nos componentes 87 do balanço de energia, de modo que a paisagem de Caatinga em regeneração apresenta maior 88 fluxo de calor latente e evapotranspiração, enquanto a área desmatada tem menor radiação 89 líquida e maior razão de Bowen.
 - **Palavras-chave:** balanço de energia superficial, florestas seca, desmatamento.

92

90

91

93

94

95 96

ABSTRACT

Changes to forests through deforestation or their replacement by agricultural areas alter evapotranspiration and the partition of available energy. Based on this, this work investigated the energy balance, evapotranspiration and its seasonality in landscapes under different levels of anthropogenic interventions in the Brazilian Semiarid region. The set of micrometeorological data was obtained for the period from September 2020 to October 2022, for three semi-arid surfaces: preserved Caatinga (CAA, native vegetation), regenerating Caatinga (REGE) and deforested area (DEFA). Here, we use the Bowen ratio energy balance method. Measurements were taken of global solar radiation (R_g) , air temperature (Tair), relative air humidity (RH), vapor pressure deficit (VPD), rain (mm), net radiation (R_n), latent heat flux (LE), sensible heat (H), soil heat (G), evapotranspiration (ET) and NDVI. Sensible heat flux (H) was the dominant flux in both areas with 66% for CAA, 63% for REGE and 62% DEFA. The LE was equivalent to 28% of the R_n for CAA, REGE and DEFA. ET in turn responded as a function of water availability, being higher during the rainy seasons, with average values of 1.82 mm day⁻¹ for CAA, 2.26 mm day⁻¹ for REGE and 1.25 mm day⁻¹ for DEFA. The variables NDVI, RH, rain, θ and LE showed a positive correlation. Thus, it is suggested that changes in land use and cover, associated with the seasonality of rain events, promote changes in the components of the energy balance, so that the regenerating Caatinga landscape presents greater latent heat flux and evapotranspiration, while the deforested area has lower net radiation and higher Bowen ration.

Keywords: surface energy budget, dry forest, deforestation.

1. INTRODUÇÃO

As regiões áridas e semiáridas recobrem cerca de 45% da superfície terrestre (Soper et al., 2017) e estão entre as mais vulneráveis a mudança no uso/cobertura da terra, devido a suas condições climáticas (Cunha et al., 2015; Jardim et al., 2022a). O Semiárido brasileiro é marcado pela variação espaço-temporal das chuvas, altas temperaturas e ocorrência de déficits hídricos em grande parte do ano (Jardim et al., 2023b; Marques et al., 2020a; Tomasella et al., 2018) e é recoberto pela Caatinga, uma das florestas tropicais sazonalmente secas mais biodiversas e com grande número de espécies endêmicas. No entanto, com o aumento das atividades antrópicas como a retirada de lenha e estabelecimento áreas cultivadas, aproximadamente 40% de sua vegetação nativa já foi alterada (Marengo et al., 2017; Althoff et al., 2018; Jardim et al., 2023).

As mudanças no uso e cobertura da terra é um dos fatores que afetam as interações entre superfície-atmosfera, com impactos na biodiversidade (Santana et al., 2021), qualidade do solo e da água (Santos et al., 2020), serviços ecossistêmicos, evapotranspiração (Biudes et al., 2015), no clima global, regional, partição da energia disponível e no balanço hídrico a partir de processos biogeoquímicos e biofísicos (Anav, 2010; Caballero et al., 2022). A retirada de vegetação nativa para a implantação de pastagens e posterior abandono dessas áreas podem resultar em processos de desertificação, que na atualidade é um dos principais desafios ambientais na região semiárida do NE do Brasil. No entanto, em escalas de até 1 km, o desmatamento não é capaz de modificar o fluxo de transpiração e consequentemente, a precipitação (Chambers & Artaxo, 2017). Mas quando essa escala é superior a 200 km os feedbacks atmosféricos tendem a reduzir drasticamente a precipitação regional (Coe et al., 2009). Portanto, avaliar a dinâmica dos fluxos de energia em função da sazonalidade e em diferentes paisagens com diferentes graus de mudança do uso da terra subsidiam o entendimento de como as mudanças na biosfera impactam no microclima e contribuem para a previsão do clima global.

No entanto, na América do Sul maior parte dos estudos acerca destes impactos tem sido direcionados ao desmatamento da floresta amazônica (Rocha et al., 2004; Meir et al., 2008; Oliveira et al., 2013; Pires; Costa, 2013; Salazar et al., 2015). Apesar dos avanços em estudos sobre a dinâmica dos fluxos de energia para a Caatinga (Oliveira et al., 2006; Borges et al., 2020; Silva et al., 2017; Souza et al., 2015; Teixeira et al., 2008), este bioma ainda não tem recebido a devida atenção quando comparado a ambientes com maior oferta de umidade, a exemplo das florestas temperadas, tropicais entre outras (Borges et al., 2020). Em regiões

marcadas pela escassez hídrica, 50% do saldo de radiação (R_n) é destinado para o fluxo de calor sensível (H), enquanto o fluxo de calor latente (LE) assume cerca de 20% do R_n (Borges et al., 2020). Souza et al. (2015) por sua vez, obtiveram valores de ordem de 77% para o H, 7% para o LE e 3% para o fluxo de calor no solo G. Apesar dos avanços, para o sertão central do semiárido brasileiro ainda são incipientes trabalhos que foram conduzidos simultaneamente a fim de avaliar a sazonalidade das variáveis micrometeorológicas, balanço de energia, fluxos diários de energia, suas partições e evapotranspiração em função dos períodos hídricos e as principais alterações microclimáticas, principalmente em áreas de caatinga com diferentes níveis de mudança do uso da terra.

A compreensão acerca dos mecanismos que são responsáveis pelo particionamento de energia (R_n) como os fluxos de superfície (i.e., H, LE e G) fornecem um arcabouço de informações climáticas e previsões meteorológicas (Rubert et al., 2022). Assim, destaque-se a importância de estudos *in situ* que avaliem o impacto dos diferentes níveis de mudança no uso da terra no microclima (Alves et al., 2022), de modo que a compreensão acerca do balanço de energia em ecossistemas terrestres, principalmente em ambientes vulneráveis as mudanças climáticas e aos impactos de ordem antrópica, se faz crucial.

Nesta perspectiva, o propósito deste estudo é inferir que o desmatamento parcial da Caatinga não resulta em impactos significativos nas trocas de energia, evapotranspiração e variáveis microclimáticas quando comparado ao desmatamento total. Assim, áreas anteriormente desmatadas podem ser utilizadas para implantação de cultivos agrícolas com o objetivo de promover o crescimento econômico, erradicação da pobreza, sustentabilidade dos ecossistemas, combater à desertificação e o avanço das mudanças climáticas. Além disso, promover a implementação de políticas públicas conforme os objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil (ODS) proposto pela Organização das Nações Unidas (ONU) com intuito de proteger o meio ambiente e o clima, os quais estão inseridos nas ODS 13 e 15. Assim, neste estudo investigou-se o balanço de energia, evapotranspiração e sua sazonalidade em paisagens sob diferentes níveis de intervenções antrópicas do Semiárido brasileiro. Para avaliar o comportamento do balanço de energia, determinou-se a sazonalidade e o comportamento diário dos fluxos, além dos períodos hídricos, disponibilidade hídrica e como isso afeta a sazonalidade da evapotranspiração para diferentes paisagens na Caatinga.

2. MATÉRIAIS E MÉTODOS

2.1. Localização e descrição da área de estudo

O estudo foi realizado na Fazenda Algodões, localizada na região do semiárido brasileiro (08°18'31" S, 38°31'37" W, com altitude de 378 m) no Sertão Central do Brasil. O clima conforme a classificação de Köppen é BSwh, semiárido quente e seco, com temperatura média de 26,1°C, e chuva média de 489,3 mm ano⁻¹ (Queiroz et al., 2019). As chuvas são sazonais com a estação seca bem definida, entre os meses de maio a novembro, uma vez que o período chuvoso compreende os meses de dezembro a abril. O solo é do tipo Luvissolo Crômico (Embrapa, 2006).

Tabela 1. Normal climatológica (1961-1990) para os elementos meteorológicos: Temperatura mínima (T_N, °C), temperatura média (T_{air}, °C), temperatura máxima (T_X, °C), umidade relativa (UR, %), chuva (mm), radiação global incidente (R_g , MJ m⁻² dia⁻¹) e evapotranspiração de referência (ET0, mm) no município de Floresta, PE, no sertão Central do Brasil. Fonte: INMET.

Mês	T_N	Tair	T_{X}	UR	VV	Chuva	R_g	ET ₀
		°C		%	m s ⁻¹	mm	MJ m ⁻² dia ⁻¹	mm
Janeiro	21,7	27,4	34,7	59,9	2,0	66,1	23,4	5,9
Fevereiro	21,5	26,7	33,9	63,8	1,9	79,4	23,6	5,7
Março	21,4	26,5	33,6	68,5	1,9	104,3	23,2	5,5
Abril	21,0	26,0	32,8	70,4	1,9	66,7	21,5	5,0
Maio	20,2	25,0	31,8	70,4	2,0	37,2	18,7	4,4
Junho	18,9	23,8	30,7	70,1	2,4	19,9	16,9	4,2
Julho	18,1	23,3	30,4	69,0	2,5	16,6	17,9	4,3
Agosto	18,1	24,1	31,7	61,1	2,7	7,0	21,8	5,4
Setembro	19,3	25,9	33,7	54,1	2,9	7,6	23,8	6,3
Outubro	20,8	27,6	35,3	50,3	2,7	12,1	25,5	6,8
Novembro	21,8	28,3	36,0	50,8	2,4	22,6	25,7	6,8
Dezembro	22,0	28,0	35,2	54,2	2,1	49,8	24,1	6,3
Anual	20,4	26,1	33,3	61,9	2,3	489,3	22,2	5,5

Foram avaliados três sítios experimentais de setembro de 2020 a outubro de 2022: floresta com vegetação de Caatinga preservada (CAA), área desmatada (DEFA) e área de

Caatinga em regeneração (REGE). Anteriormente a área de Caatinga (CAA) era utilizada para extração de madeira para construção de cercas, currais e para o uso doméstico. Composta por espécies herbáceas, arbustivas e arbóreas, há predominância de espécies arbustivo-arbóreas de pequeno porte com indivíduos inferiores a 7 m de altura, como *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P Lewis, *Aspidosperma pyrifolium* Mart., *Jatropha mollissima* (Pohl) Baill., *Commiphora leptophloeos* (Mart.). J.B Gillett, e *Spondias tuberosa* Arruda.

A área desmatada (DEFA) originalmente era composta por vegetação Caatinga, a qual foi retirada para fins de atividades agrícolas com o cultivo de *Gossypium hirsutum* (L.), *Allium cepa* (L.), *Phaseolus vulgaris*, *Zea mays* e *Urochloa mosambicensis* (Hack) Dandy. Contudo, desde 2005 a área não vem sendo cultivada e atualmente está em processo de regeneração, com a presença de gramíneas rasteiras e arbustos de até 1,0 m e grandes áreas de solo exposto.

Diferentemente da DEFA que foi completamente desmatada, a área de Caatinga em regeneração (REGE) foi parcialmente desmatada com a permanência de espécies como *Spondias tuberosa* Arruda, *Cnidoscolus quercifolius* Pohl, *Schinopsis brasiliensis* Engl., *Myracrodruon urundeuva* Allemão, *Sideroxylon obtusifolium* e alguns arbustos. No entanto, comparada à CAA, a REGE apresenta menor densidade de plantas. O desmatamento da área ocorreu em 2008 para implantação de capim buffel (*Cenchrus ciliares* L.) para criação de ovinos, no entanto, não foi implantado e desde então a área vem se regenerando.

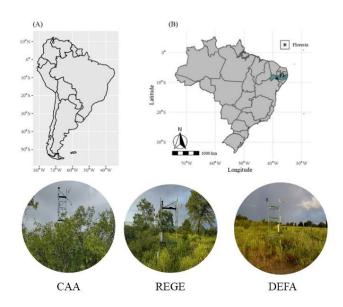


Figura 1. Localização da área de estudo e dos três sítios experimentais: Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA).

2.2. Monitoramento, aquisição dos dados micrometeorológicos e umidade do solo As condições micrometeorológicas foram monitoradas diariamente a partir de sensores eletrônicos (Tabela 2), de baixa frequência, instalados em torres de ferro galvanizado que estão presentes nos sítios de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA), nos quais foram obtidos: radiação solar (R_g), radiação líquida (R_n), temperatura do ar (Tair), umidade relativa do ar (RH) e fluxo de calor no solo (G). As medidas foram realizadas a cada 60 segundos com armazenamento dos valores médios a cada 10 minutos, por meio de um datalogger (CR1000, Campbell Scientific, Logan, USA) para as áreas de Caatinga em regeneração e área desmatada, já para a área de Caatinga preservada foi utilizado um datalogger modelo CR3000 (Campbell Scientific, Logan, UT, USA). Os termohigrometros presentes em cada uma das torres foram instalados a 0,5 m e 1,5 m acima do dossel da vegetação.

Tabela 2. Variáveis analisadas e instrumentos instalados nas torres micrometeorológicas presentes nas áreas de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA) presentes na Fazenda Algodões, munícipio de Floresta, Pernambuco, Brasil.

Variável	Instrumento	Descrição do	Altura	
variavei	instrumento	equipamento	(m)	
Saldo de radiação (MJ m ⁻	Saldo radiômetro	NR-Lite, Inc, Logan,	8, 3 e	
2 dia $^{-1}$)		Utah, USA	3	
Radiação solar global	Piranômetro	SQ-300,	8, 3 e	
$(MJ m^{-2} dia^{-1})$		Apogee/Campbell	3	
		Scientific, Inc, Logan,		
		Utah, USA		
Chuva (mm)	Pluviômetro	CS700-L, Hydrological,	8, 3 e	
		Services, Liverpool,	3	
		Austrália		
Radiação	Sensor quântico	Q321, Apogee/Campbell		
fotossinteticamente ativa	linear	Scientific, Inc, Logan,		
$(MJ m^{-2} dia^{-1})$		Utah, USA		
Fluxo de calor no solo	Fluxímetro	HFP-155A, Hukseflux,	0,05 m	
$(MJ m^{-2} dia^{-1})$	Delft, The			
		Netherlands		
Temperatura (°C) e	Termohigrômetro	HMP155A, Vaisala,	0,50 e	
umidade (%) do ar		Helsinki,	1,5	
		Finland		
Velocidade (m s ⁻¹) e	Anemômetro	034-L, R. M. Young Co.,	8, 3 e	
direção do vento (°)		Traverse, MI, USA	3	

A umidade volumétrica do solo foi obtida para os três sítios experimentais, semanalmente, com o auxílio de uma sonda capacitiva modelo Diviner 2000 (Sentek Pty Ltd., Austrália) em profundidades de 0,10 a 0,60 m. A sonda capacitiva foi calibrada conforme as condições edáficas das áreas experimentais, seguindo a metodologia de Silva et al. (2014).

2.3. Estimativas do balanço de energia e evapotranspiração pelo método razão de Bowen

Os fluxos de calor latente (LE), sensível (H), no solo (G) e a evapotranspiração foram calculados a partir do método da razão de Bowen. O método da razão de Bowen (β) proposto em 1926 tem sido bastante utilizado por apresentar um conceito físico claro e cálculos simples (Hu et al., 2014), o qual é obtido por meio da constante psicométrica (λ) a partir gradientes

verticais de temperatura (ΔT) e pressão real de vapor (Δe) (Euser et al., 2014). No entanto, segundo o método da razão de Bowen dentro da camada superficial de equilíbrio os coeficientes de transporte turbulento de calor e vapor de água são iguais ($K_h = K_w$) (Dicken et al., 2013). Em função disso, pode-se haver um número maior de desvios/erros devido à variabilidade climática, vegetal e outros fatores, fazendo-se necessário aceitar ou rejeitar os dados observados (Hu et al., 2014). De modo que, o método perde sua precisão em condições que β assume valores -1, que corresponde aos valores obtidos próximo ao nascer e ao pôr do sol. Para contornar esse problema, os valores que estão incluídos dentro de um intervalo fixo, a exemplo β <- 0,75 ou - 1,3 < β <-0,7 são excluídos por alguns autores (Ortega-Farias et al., 1996; Unland et al., 1996), no entanto, dentro desse intervalo deve-se considerar a precisão dos sensores que estão sendo utilizados (Perez et al., 1999).

Os efeitos da advecção horizontal, armazenamento de energia no dossel, no solo, na biomassa e a energia utilizada para a fotossíntese foram desconsiderados (Jamiyansharav et al., 2011; Sun et al., 2010) por representarem menos de 2% da radiação líquida (Heilman et al., 1994; Campos et al., 2019). O efeito da advecção pode ser desconsiderado quando as condições são uniformes, visto que o gradiente vertical de energia que inclui os elementos meteorológicos tende a ser maior quando comparado ao gradiente horizontal (Hu et al., 2014; Jardim et al., 2023a). Além disso, a razão máxima entre altura e fetch dos sensores foi de 100:1 na CAA, 70:1 na DEFA e 80:1 na REGE.

Os valores de *LE*, *H* e *G* (em W m⁻²) foram obtidos a cada 10 minutos e integrados ao longo do período diurno. Assim, conforme o princípio de conservação de energia, a partição de energia à superfície foi estimada de acordo com Hu et al. (2014) como segue a Eq. (1).

$$R_n = LE + H + G \tag{1}$$

Para obtenção das estimativas dos fluxos de *H* e *LE* utilizou-se o método da razão de Bowen conforme a metodologia proposta por Perez et al. (1999) por meio das Eq. (2 e 3):

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \tag{2}$$

$$H = \frac{\beta (R_n - G)}{1 + \beta} \tag{3}$$

288 em que, LE e H são os fluxos de calor latente e sensível, R_n é a radiação liquida, G é o fluxo de calor no solo e β é a razão de Bowen (adimensional), que foi calculada conforme a Eq. (4).

290
$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} = \left(\frac{Cp}{\lambda 0,622}\right) \left(\frac{\Delta T}{\Delta e}\right) \tag{4}$$

em que, γ é a constante psicométrica (kPa °C⁻¹); ΔT e Δe são as diferenças de temperatura e de pressão de vapor d'água, para os dois níveis de medição acima da superfície, respectivamente; C_p é o calor específico à pressão constante (1.004,67 J Kg⁻¹ K⁻¹), 0,622 representa a proporção de pesos moleculares da água e do ar seco e λ é o calor latente de vaporização, conforme a Eq. (5).

296
$$\lambda = 1,9198 \text{ x} 10^{6} \left[\frac{\text{T+273,16}}{(\text{T+273,16})^{-33,91}} \right]^{2}$$
 (5)

297 em que, T é a temperatura média do ar (°C).

298 A evapotranspiração (ET, mm dia⁻¹) foi obtida a partir da Eq. (6).

$$ET = \frac{LE}{\lambda} \tag{6}$$

Para aceitação ou rejeição dos dados obtidos através do método de Bowen foi utilizado os critérios descritos Perez et al. (1999). Conforme a recomendação dos autores, foi avaliado a consistência física dos dados com base nos gradientes de pressão de vapor d'água para cada horário de medição, de modo que as estimativas de *LE* e *H* devem ser consistentes com a relação fluxo-gradiente e conforme a conversão de sinais. Logo, as expressões devem ser organizadas da seguinte maneira:

$$R_n = \left(1 + \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e}\right) + LE + G$$

307
$$\frac{\Delta e}{LE} = \gamma \frac{\Delta T}{H} = \frac{\Delta e + \gamma \Delta T}{R_n - G} > 0$$

Conforme a convenção de sinais, as expressões acimas devem ser sempre > 0. Assim, os dados obtidos pelo método do balanço de energia pela razão de Bowen permitem apenas duas condições que são válidas para estimar os valores de *LE* e *H*:

- a) Quando $R_n G > 0$ e $\beta > -1$, conforme a Equação (2), LE deve ser sempre > 0, enquanto H (Equação 3) pode ser positivo ou negativo. Sendo $\beta < -1$, LE < 0 e H > 0.
- b) Em casos que R_n G < 0: Quando β < 1, as únicas configurações possíveis são LE >
 0 e H < 0. Quando β > -1, LE deve ser sempre negativo enquanto H pode ser positivo
 ou negativo de acordo com o sinal de β.

Sob estas condições não se considera o efeito da advecção (A). Sendo assim, quando as condições não são favoráveis, o balanço de energia pela razão de Bowen pode apresentar falhas, as quais serão classificadas em cinco tipos de erro (A, B, C, D e E) como descritos por Perez et al. (1999) (Tabela 3).

Tabela 3. Resumo dos erros em que o balanço de energia de superfície pelo método da razão de Bowen (BERB) falha, segundo critérios de Perez et al. (1999).

Tipo de Erro	Condição
A	$(R_n$ - $G) > 0$, $\Delta e > 0$, $\beta < -1 + \varepsilon $
В	$(R_n-G) > 0, \Delta e < 0, \beta > -1 - \varepsilon $
C	$(R_n-G)<0,\Delta e>0,\beta>-1- \varepsilon $
D	$(R_n-G)<0, \Delta e<0, \beta<-1+ \varepsilon $
E	Mudanças rápidas na temperatura e pressão de vapor

Com os dados considerados consistentes, foram estimados os valores de LE e H para o período de energia disponível positiva ($R_n - G > 0$).

2.4. Dados de NDVI

O comportamento sazonal da vegetação em resposta a variabilidade das chuvas foi avaliado a partir do dados de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) para avaliar a qualidade e quantidade da vegetação, os cálculos foram obtidos a partir dos valores de refletância do vermelho e do infravermelho próximo (Equação 7)

$$NDVI = \frac{\rho NIR - \rho Vermelho}{\rho NIR + \rho Vermelho}$$
 (7)

em que ρ NIR e ρ Vermelho são as refletâncias medidas nas bandas do infravermelho e vermelho próximo (ou seja, bandas multiespectrais Landsat-8 5 e 4 do sensor OLI), respectivamente. Os valores variam de -1 a +1. Valores próximos de 1 na escala positiva indicam alta atividade fotossintética, em caso de valores negativos, estes correspondem a corpos d'água.

2.5. Análises de dados e tratamentos estatísticas

Para melhor análise dos dados, foram delimitados estações de acordo com o número de eventos e a chuva acumulada, de modo semelhante à metodologia descrita por Queiroz et al. (2020). Para isso, as seguintes estações foram consideradas: chuvosa, seca e suas transições (seca-chuvosa e chuvosa-seca) (Tabela 4). A estação seca é aquele no qual a soma dos valores de chuva dos 30 dias que antecedem e sucedem o dia em análise for inferior a 20 mm e forem registrados menos que 5 dias chuvosos; de modo que, se neste intervalo de tempo houver valores superiores a 20 mm em cinco ou mais dias, a estação será considerada chuvosa. Caso nenhum desses critérios sejam aplicados, a estação é classificada como em transição, sendo

elas: seca-chuvosa, caso ocorra em uma estação seca, ou, chuvosa-seca, se ocorrer após uma estação chuvosa (Queiroz et al., 2020).

349

350

351

347

348

Tabela 4. Delimitação das estações com base no número de eventos e lâminas de chuva acumulada (mm).

Estação	Início	Final	Nº de eventos	mm
Seca	16-Aug-2020	6-Oct-2020	51	2
Seca-Chuvosa	6-Oct-2020	19-Feb-2021	136	208
Chuvosa	19-Feb-2021	3-May-2021	73	179
Chuvosa-Seca	3-May-2021	25-Jul-2021	83	31
Seca	25-Jul-2021	22-Sep-2021	59	4
Seca-Chuvosa	22-Sep-2021	5-Dec-2021	74	134
Chuvosa	5-Dec-2021	3-Jul-2022	210	568
Chuvosa-Seca	3-Jul-2022	20-Aug-2022	48	24
Seca	20-Aug-2022	27-Sep-2022	38	3
Seca-Chuvosa	27-Sep-2022	1-Jan-2023	96	230

352

353

354

355

356

357

358

359

360

361

362

363

364

365

366

367

368

369

370

Os dados foram analisados em escalas de tempo diária, mensal e sazonal. Posteriormente, determinou-se os valores médios, desvios-padrões, intervalo de confiança e coeficiente de variação por meio de estatística descritiva para os valores médio das variáveis de temperatura, umidade relativa do ar, déficit de pressão de vapor (Tair, RH_M e VPD_M), máximos (T_X, RH_X e VPD_X) e mínimos (T_N, RH_N, e VPD_N), assim como as variáveis de radiação líquida diurna $(R_n > 0)$, R_n diário, G diurno (G>0), G diário, fluxo de calor latente (LE), calor sensível (H), evapotranspiração e as partições dos fluxos (LE/R_n , H/R_n , e G/R_n). Para avaliar a distribuição normal dos dados para o balanço de energia e seus componentes, evapotranspiração e as variáveis micrometeorológicas para os três sítios experimentais foram utilizados os testes Shapiro-Willk, Anderson-Darling, Lilliefors e Jarque-Bera. As variáveis micrometeorológicas (Tair, Tx, Tn, RHm, URx, RHn, VPDm, VPDx, VPDn, Rn diurno, Rn diário, G diurno, G diário, LE, H, ET, LE/ R_n , H/ R_n , G/ R_n) foram comparadas entre as três superfícies por meio de estatística não paramétrica, utilizando os testes de Kruskal-Wallis para k amostras (p<0,05) e o teste de média de Dunn (p<0,05) o qual comparou os valores médios entre as estações nas diferentes superfícies. A partição do balanço de energia foi obtida a partir da razão da radiação líquida diurna $(R_n > 0)$ e os componentes do balanço $(LE, H \in G)$. Posteriormente, a análise de componentes principais (PCA) foi realizada para identificar quais variáveis mais influenciam no balanço de energia. Este método permite que os parâmetros estatísticos reduzam

- 371 variáveis ortogonais e não correlacionadas, explicando a maior variação dos dados (Jardim et
- 372 al., 2021). A análise estatística foi realizada no XLSTAT software, versão 2018
- 373 (https://www.xlstat.com/Addinsoft, Paris, France. www.xlstat.com).

3. RESULTADOS

374

375

3.1. Condições meteorológicas

376 A Figura 2 mostra a série temporal de dois anos da radiação solar global (R_g) , temperatura 377 do ar (Tair), umidade relativa do ar (RH), déficit de pressão de vapor (VPD), chuva e umidade 378 volumétrica do solo (θ) , nos quais observa-se uma clara variação sazonal. Nota-se que os dados 379 de R_g apresentam sazonalidade, atingindo os maiores valores durante a primavera e verão (i.e., 380 setembro a março), período em que há maior disponibilidade de energia para a partição em H, 381 LE e G. Os menores valores de R_g geralmente ocorrem entre o outono e inverno (i.e., abril a agosto), com média de 20,29 MJ m⁻² dia⁻¹ em função da maior cobertura de nuvens com 382 383 diminuição da disponibilidade energética para as trocas de calor e água (Figura 2A). A 384 temperatura do ar acompanha o comportamento sazonal da radiação solar (R_g) (Figura 2B), com 385 média de 26,09 °C para CAA, 26,21 °C para REGE e 26,11 °C para DEFA. O valor médio de 386 VPD para CAA foi de 1,52 kPa, atingindo valores máximo de 3,30 kPa e mínimo de 0,21 kPa, 387 e a REGE apresentou média para VPD de 1,56 kPa, com máximo e mínimo variando entre 3,62 388 kPa e 0,20 kPa, respectivamente. Por outro lado, o VPD médio da DEFA foi 1,53 kPa, com 389 máximo de 3,37 kPa e mínimo de 0,25 kPa (Tabela 5 e Figura 2D). Os resultados da chuva 390 acumulada para os anos de 2020, 2021 e 2022 foram de 178,81 mm, 447,55 mm e 525,02 mm, 391 respectivamente para CAA, 196,6 mm, 504, 95 e 498,35 mm para REGE e 184,40 mm, 497,33 392 mm e 554,23 mm para DEFA (Figura 2E). No entanto, os dados de chuva para o ano de 2020, 393 correspondem apenas aos meses de setembro a dezembro do mesmo ano, quando se iniciou a 394 coleta dos dados. A DEFA apresentou maior valor total acumulado de 1.235,96 mm, seguido 395 da REGE e CAA com 1.151,38 e 1.199,90 mm, respectivamente.

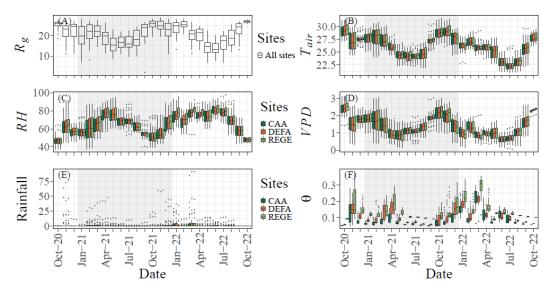


Figura 2. Variabilidade sazonal das variáveis meteorológicas: (A) radiação solar global (R_g , MJ m⁻² dia⁻¹), (B) temperatura do ar (Tair, °C), (C) umidade relativa do ar (RH, %), (D) déficit de pressão de vapor (VPD, kPa), (E) chuva (mm) e (F) umidade volumétrica do solo (θ, cm³ cm⁻³) de 2020 a 2022 para CAA, REGE e DEFA.

A Tabela 5 apresenta a estatística das variáveis de temperatura (Tair, T_X, T_N), umidade relativa do ar (*RH*_M, *RH*_X, *RH*_N), déficit de pressão de vapor (*VPD*_M, *VPD*_X, *VPD*_N) média, máxima e mínima em detrimento das estações adotados para CAA, REGE e DEFA (p<0,05). A temperatura média do ar (Tair) não apresentou diferença estatística entre as estações para as três superfícies (p>0,05). No entanto, de modo geral, a temperatura máxima (T_X) foi maior na RGE com valores médios acima de 33,89 °C. Enquanto a temperatura mínima (T_N) obteve

valores médios maiores a CAA em toda as estações, exceto a seca-chuvosa. Quanto a umidade relativa do ar média (UR_M), houve diferença significativa para a segunda estação chuvosa de 2021 com valores maiores para a REGE (~3%) com média de 76,5% (p<0,05). Similarmente, a umidade relativa do ar máxima (UR_X) foi estatisticamente superior na REGE com valores de até 98%, de modo que, para a estação de transição chuvosa-seca a DEFA apresentou maior UR_X (99,1%) em relação a REGE e a CAA (p<0,05). Contrariamente, para umidade relativa do ar

mínima (UR_N) não houve diferença estatística entre as três superfícies, com valores mínimos de 21,6%, 20,3% e 20,6% para CAA, REGE e DEFA, respectivamente.

Os valores de déficit de pressão de vapor d'água médio ($VPD_{\rm M}$) não foram estatisticamente diferentes em ambas as superfícies (p>0,05), enquanto o déficit de pressão de vapor máximo ($VPD_{\rm X}$) apresentou valores médios superiores para as estações chuvosa (ano) e transições secachuvosa e chuvosa-seca para REGE (p<0,05) com médias superiores a 4,03 kPa. O déficit de

Tabela 5. Temperatura média (Tair, °C), umidade relativa do ar (RH, %) e déficit de pressão de vapor d'água (*VPD*, kPa) médio (_M), máximo (_X) e mínimo (_N) em função dos regimes hídricos para os sítios de Caatinga (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA), situados no município de Floresta, região central do estado de Pernambuco, Sertão Central do Brasil.

Estação	Ano	n	α	μ	1-α	α	μ	1-α	α	μ	1-α
				CAA			REGE			DEFA	
							Tair				
Seca	2020	5	26,9	27,7a	28,4	27,2	28,0a	28,8	27,0	27,8a	28,5
Seca-Chuvosa	2021	136	27,7	27,9a	28,2	27,9	28,1a	28,4	27,7	27,9a	28,2
Chuvosa	2021	73	26,3	26,6a	26,9	26,3	26,6a	26,9	26,2	26,5a	26,8
Chuvosa-Seca	2021	83	24,1	24,3a	24,5	24,1	24,3a	24,5	24,0	24,2a	24,4
Seca	2021	59	24,9	25,4a	25,8	25,1	25,6a	26,0	25,0	25,4a	25,8
Seca-Chuvosa	2021	74	28,3	28,6a	28,9	28,5	28,8a	29,2	28,3	28,6a	29,0
Chuvosa	2021	210	25,5	25,7a	25,9	25,5	25,7a	26,0	25,6	25,8a	26,0
Chuvosa-Seca	2022	48	22,4	22,8a	23,1	22,5	22,8a	23,2	22,4	22,7a	23,1
Seca	2022	38	24,1	24,7a	25,3	24,4	25,0a	25,6	24,2	24,8a	25,4
Seca-Chuvosa	2022	10	26,5	27,2a	27,9	26,8	27,5a	28,3	26,6	27,3a	28,0
Média		736	25,66	26,08	26,49	25,82	26,25	26,68	25,69	26,11	26,52
							T _X				
Seca	2020	5	33,9	35,1a	36,2	34,9	36,3a	37,7	34,4	35,6a	36,8
Seca-Chuvosa	2021	136	33,8	34,2b	34,6	34,9	35,4a	35,8	34,1	34,5b	34,9
Chuvosa	2021	73	32,3	32,7b	33,2	33,2	33,7a	34,2	32,4	32,8b	33,3
Chuvosa-Seca	2021	83	29,9	30,3b	30,6	31,1	31,5a	31,9	30,3	30,7b	31,0
Seca	2021	59	31,3	31,9b	32,4	32,6	33,2a	33,8	31,8	32,4ab	33,0
Seca-Chuvosa	2021	74	34,9	35,2b	35,5	36,1	36,4a	36,8	35,2	35,5b	35,8
Chuvosa	2021	210	31,3	31,6b	31,9	32,5	32,8a	33,2	31,7	32,0b	32,4
Chuvosa-Seca	2022	48	28,1	28,8b	29,4	29,5	30,2a	30,9	28,6	29,3ab	29,9
Seca	2022	38	30,5	31,4b	32,2	32,2	33,1a	34,0	31,2	32,1ab	32,9
Seca-Chuvosa	2022	10	33,8	34,7b	35,6	35,6	36,4a	37,1	34,5	35,3ab	36,2
Média		736	31,99	32,58c	33,17	33,26	33,89a	34,53	32,41	33,02b	33,62
							$T_{\rm N}$				
Seca	2020	5	18,8	19,8a	20,7	17,5	18,8a	20,2	17,5	18,9a	20,3
Seca-Chuvosa	2021	136	21,7	22,0a	22,3	21,1	21,4b	21,7	21,2	21,5ab	21,8
Chuvosa	2021	73	21,3	21,5a	21,8	20,7	21,0b	21,3	20,8	21,1ab	21,4

Chuvosa-Seca	2021	83	18,7	19,1a	19,5	17,7	18,2b	18,7	17,8	18,3ab	18,8
Seca	2021	59	18,6	19,1a	19,5	17,5	18,0b	18,6	17,6	18,2ab	18,8
Seca-Chuvosa	2021	74	22,2	22,6b	23,0	21,6	22,0a	22,5	21,8	22,3b	22,7
Chuvosa	2021	210	21,0	21,2a	21,5	20,4	20,7b	20,9	20,8	21,0a	21,3
Chuvosa-Seca	2022	48	17,0	17,5a	18,0	15,6	16,3b	16,9	16,0	16,6ab	17,2
Seca	2022	38	17,8	18,4a	19,1	16,5	17,3b	18,1	16,8	17,6ab	18,4
Seca-Chuvosa	2022	10	17,9	19,0a	20,2	16,1	17,6a	19,0	16,4	17,9a	19,3
Média		736	19,50	20,03a	20,55	18,47	19,12b	19,78	18,68	19,34b	20,00
							RH_M				
Seca	2020	5	46,7	49,1a	51,6	46,5	48,8a	51,2	46,8	49,2a	51,6
Seca-Chuvosa	2021	136	54,1	55,8a	57,5	54,7	56,5a	58,3	54,8	56,6a	58,3
Chuvosa	2021	73	67,0	69,4a	71,8	69,4	71,9a	74,4	68,6	70,9a	73,3
Chuvosa-Seca	2021	83	69,8	71,4a	73,0	70,2	71,8a	73,5	70,2	71,8a	73,3
Seca	2021	59	58,1	59,8a	61,5	57,8	59,6a	61,3	58,2	59,9a	61,6
Seca-Chuvosa	2021	74	52,4	54,5a	56,6	52,7	55,0a	57,4	53,0	55,2a	57,4
Chuvosa	2021	210	72,6	73,8b	75,0	75,2	76,5a	77,7	73,4	74,5b	75,6
Chuvosa-Seca	2022	48	72,7	75,2a	77,6	72,9	75,4a	77,9	72,1	74,4a	76,8
Seca	2022	38	59,2	61,9a	64,5	59,0	61,5a	64,1	58,9	61,3a	63,8
Seca-Chuvosa	2022	10	47,4	49,8a	52,2	47,3	49,4a	51,6	47,2	49,4a	51,6
Média		736	60,00	62,02a	64,12	60,57	62,65a	64,73	60,32	62,33a	64,34
							RH_X				
Seca	2020	5	79,5	82,8a	86,2	81,5	85,2a	88,8	80,5	85,3a	90,1
Seca-Chuvosa	2021	136	81,9	83,4b	84,8	84,5	86,0a	87,5	83,6	85,0ab	86,4
Chuvosa	2021	73	92,9	94,2b	95,5	95,9	96,9a	97,8	94,1	95,1b	96,1
Chuvosa-Seca	2021	83	95,0	95,7b	96,4	96,9	97,6a	98,2	95,0	95,6b	96,3
Seca	2021	59	86,6	88,0b	89,5	89,2	90,7a	92,3	87,7	89,1ab	90,6
Seca-Chuvosa	2021	74	79,4	81,5a	83,7	82,7	84,9a	87,2	81,7	83,9a	86,1
Chuvosa	2021	210	94,9	95,7c	96,4	97,3	98,0a	98,6	97,1	97,8b	98,4
Chuvosa-Seca	2022	48	96,3	97,1c	97,8	98,1	98,6b	99,2	98,7	99,1a	99,6
Seca	2022	38	87,8	90,2a	92,5	90,0	92,3a	94,6	90,9	93,1a	95,3
Seca-Chuvosa	2022	10	83,6	86,4b	89,3	86,7	89,3ab	91,9	88,8	90,9a	92,9
Média		736	87,79	89,50c	91,20	90,29	91,95a	93,62	89,82	91,50b	93,18
							RH_N				
Seca	2020	5	16,7	21,7a	26,6	16,0	20,8a	25,7	16,0	20,9a	25,7
Seca-Chuvosa	2021	136	29,8	31,6a	33,3	28,9	30,6a	32,4	29,3	31,0a	32,8
Chuvosa	2021	73	37,8	40,1a	42,4	37,7	40,0a	42,3	38,5	40,8a	43,1
Chuvosa-Seca	2021	83	41,1	43,3a	45,5	38,9	41,1a	43,3	40,0	42,2a	44,5
Seca	2021	59	30,9	32,9a	34,8	29,2	31,1a	33,0	29,7	31,6a	33,6
Seca-Chuvosa	2021	74	27,0	28,6a	30,3	26,1	27,7a	29,3	26,6	28,3a	30,0
Chuvosa	2021	210	43,7	45,1a	46,5	43,1	44,5a	45,9	43,6	45,0a	46,4
				,			,			,	

Chuvosa-Seca	2022	48	42,5	46,2a	49,8	40,2	44,0a	47,7	41,1	44,8a	48,6
Seca	2022	38	31,5	34,4a	37,4	29,0	31,8a	34,5	29,5	32,3a	35,1
Seca-Chuvosa	2022	10	18,9	21,6a	24,4	17,8	20,3a	22,7	18,0	20,6a	23,1
Média		736	31,99	34,55a	37,10	30,70	33,20a	35,69	31,22	33,76a	36,29
							$VPD_{ m M}$				
Seca	2020	5	2,17a	2,38	2,05	2,27a	2,49	1,99	2,21a	2,42	2,17a
Seca-Chuvosa	2021	136	1,88a	1,97	1,81	1,91a	2,01	1,77	1,87a	1,96	1,88a
Chuvosa	2021	73	1,24a	1,36	1,07	1,19a	1,31	1,08	1,19a	1,30	1,24a
Chuvosa-Seca	2021	83	1,01a	1,08	0,97	1,04a	1,11	0,95	1,02a	1,08	1,01a
Seca	2021	59	1,50a	1,60	1,47	1,57a	1,67	1,43	1,52a	1,62	1,50a
Seca-Chuvosa	2021	74	2,00a	2,11	1,93	2,05a	2,17	1,87	1,99a	2,11	2,00a
Chuvosa	2021	210	1,02a	1,08	0,91	0,97a	1,03	0,95	1,00a	1,06	1,02a
Chuvosa-Seca	2022	48	0,83a	0,93	0,76	0,87a	0,98	0,75	0,86a	0,96	0,83a
Seca	2022	38	1,40a	1,55	1,34	1,49a	1,64	1,30	1,44a	1,59	1,40a
Seca-Chuvosa	2022	10	2,10a	2,24	2,08	2,23a	2,37	2,01	2,16a	2,30	2,10a
Média		736	1,52a	1,63	1,44	1,56a	1,68	1,41	1,53a	1,64	1,52a
							VPD_{X}				
Seca	2020	5	3,87	4,41a	4,94	4,08	4,75a	5,42	3,94	4,54a	5,15
Seca-Chuvosa	2021	136	3,58	3,74b	3,90	3,86	4,03a	4,21	3,64	3,80ab	3,97
Chuvosa	2021	73	2,82	3,00a	3,19	2,96	3,17a	3,38	2,79	2,97a	3,16
Chuvosa-Seca	2021	83	2,33	2,47b	2,60	2,59	2,74a	2,90	2,39	2,53ab	2,67
Seca	2021	59	3,02	3,20a	3,38	3,33	3,53a	3,73	3,12	3,31a	3,49
Seca-Chuvosa	2021	74	3,90	4,05b	4,21	4,21	4,39b	4,56	3,92	4,08a	4,24
Chuvosa	2021	210	2,50	2,60ab	2,70	2,69	2,80a	2,92	2,46	2,56b	2,67
Chuvosa-Seca	2022	48	1,95	2,17a	2,39	2,21	2,47a	2,73	1,96	2,21a	2,46
Seca	2022	38	2,79	3,07a	3,34	3,20	3,51a	3,81	2,92	3,20a	3,49
Seca-Chuvosa	2022	10	4,00	4,32a	4,65	4,49	4,81a	5,12	4,16	4,47a	4,78
Média		736	3,08	3,30b	3,53	3,36	3,62a	3,88	3,13	3,37b	3,61
							$VPD_{ m N}$				
Seca	2020	5	0,30	0,40a	0,50	0,23	0,33a	0,43	0,21	0,33a	0,45
Seca-Chuvosa	2021	136	0,27	0,32b	0,37	0,33	0,38a	0,43	0,36	0,40a	0,45
Chuvosa	2021	73	0,06	0,09ab	0,12	0,06	0,08b	0,11	0,08	0,11a	0,14
Chuvosa-Seca	2021	83	0,06	0,08a	0,10	0,04	0,06b	0,07	0,06	0,08a	0,10
Seca	2021	59	0,19	0,23a	0,28	0,17	0,21a	0,24	0,20	0,24a	0,27
Seca-Chuvosa	2021	74	0,35	0,43a	0,51	0,35	0,42a	0,49	0,41	0,47a	0,54
Chuvosa	2021	210	0,06	0,08b	0,10	0,04	0,06b	0,08	0,18	0,20a	0,21
Chuvosa-Seca	2022	48	0,03	0,05a	0,06	0,02	0,03a	0,04	0,11	0,13a	0,14
Seca	2022	38	0,12	0,18b	0,24	0,12	0,18b	0,23	0,22	0,27a	0,32
Seca-Chuvosa	2022	10	0,18	0,28a	0,38	0,17	0,23a	0,29	0,27	0,31a	0,36
Média		736	0,16	0,21b	0,27	0,15	0,20b	0,24	0,21	0,25a	0,30

Médias (μ) na horizontal seguidas pela mesma letra, dentro da mesma estação não se diferem entre si ao nível de significância (α < 0,05) pelo teste não paramétrico de Dunn (comparação entre K amostras). α , 1- α – indicam o intervalo de confiança.

As respostas do NDVI acompanharam as variações climáticas para o período estudado (Figura 3). Houve variabilidade sazonal do NDVI principalmente com os eventos de chuva. Os valores máximos de NDVI foram registrados durante a estação chuvosa, com valores médios de ~ 0,62 para CAA, 0,64 para REGE e 0,66 para DEFA. Como esperado, há uma redução do NDVI durante a estação seca, sendo esta responsável pelos menores valores registrados, com ~0,14 para CAA e REGE e 0,09 para DEFA.

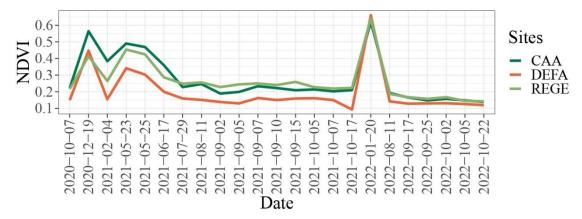


Figura 3. Comportamento do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) nos sítios experimentais de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA) no munícipio de Floresta, Pernambuco, Brasil, durante o período de Setembro de 2020 a Outubro de 2022.

3.2. Partição e balanço de energia

A Figura 4 apresenta a densidade dos fluxos de energia horários para as áreas de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA) durante as estações seca e chuvosa e suas transições, seca-chuvosa e chuvosa-seca. A Tabela 6 mostra a estatística dos fluxos diurnos de energia entre as superfícies pelo teste de Dunn (p<0,05). De modo geral, independente do sítio experimental, observa-se que mais de 60% da energia disponível de R_n é dissipada como fluxo de calor sensível (H), até mesmo na estação chuvosa, seguido pelo fluxo de calor latente (LE) com aproximadamente 20% e menos de 10% para o fluxo de calor no solo (G). Além disso, o comportamento diário dos fluxos de energia acompanha a curva de R_n , de modo que os valores máximos foram registrados entre e 11:00 e 12:00 horas (horário local). Embora H seja responsável por utilizar grande parte da energia

disponível de R_n , durante a estação chuvosa e nas transições seca-chuvosa e chuvosa-seca há um aumento em LE, principalmente na CAA e na REGE, com aumentos de 189%, 50%, 54% para CAA e 320%, 159% e 51% na REGE, respectivamente (Figura 4 D-M). No entanto, a DEFA apresentou um comportamento contrastante, de modo que LE mostrou valores muito baixos nas estações chuvosas e suas respectivas transições (Figura 4F, 4I e 4M e Tabela 6). Contudo, os aumentos de LE na DEFA são governados por VPD (Figura 4F, 4I, Figura 5E e F). Quanto ao fluxo de calor no solo (G), este apresentou comportamento semelhante ao LE durante a estação seca e a transição seco-chuvosa na CAA e REGE (Figura 4A, 4B, 4D e 4E), enquanto na estação chuvosa seus valores são inferiores 80% e 84% ao LE, respectivamente (Figura 4G), sendo maior ou igual na estação chuvosa e nas transições seca-chuvosa e chuvosa-seca (Figura 4F, 4I e 4M).



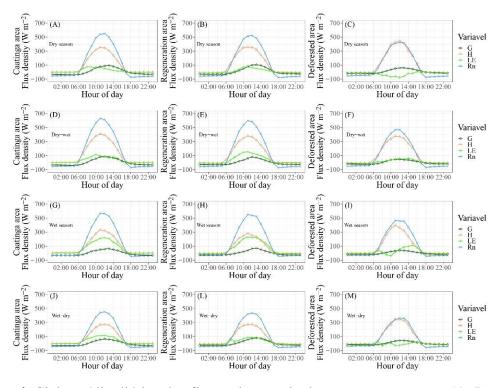


Figura 4. Ciclo médio diários dos fluxos de energia durante a estação seca (A, B e C), transição seca-chuvosa (D, E e F), chuvosa-seca (G, H e I) e chuvosa (J, L e M) para CAA (A, D, G e J), REGE (B, E, H e L) e DEFA (C, F, I e M).

Tabela 6. Densidade dos fluxos de energia diurnos (R_n – saldo de radiação, G – fluxo de calor no solo, LE – fluxo de calor latente e H – fluxo de calor sensível, MJm⁻² dia⁻¹) em função dos regimes hídricos, para os sítios de Caatinga (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área

desmatada (DEFA), situados no munícipio de Floresta, região central do estado de Pernambuco,
 Sertão central do Brasil.

Estação	Ano	n	α	μ	1-α	α	μ	1-α	α	μ	1-α
			C	CAA			REGE			DEFA	
	•						$R_n(+)$				
Seco	2020	5	15.5	16,1a	16,7	14,7	15,3ab	15,8	11,7	12,0b	12.3
Seco-Chuvoso	2021	136	13.9	14,5a	15,1	13,2	13,8a	14,3	10,6	11,1b	11.6
Chuvoso	2021	73	12.7	13,4a	14,2	12,4	13,1a	13,8	10,5	11,1b	11.6
Chuvoso-Seco	2021	83	9.7	10,2a	10,8	9,5	10,0a	10,5	7,9	8,2b	8.5
Seco	2021	59	11.5	12,3a	13,1	11,2	11,9a	12,7	8,9	9,4b	9.9
Seco-Chuvoso	2021	74	14.7	15,2a	15,7	14,1	14,6a	15,0	11,0	11,4b	11.8
Chuvoso	2021	210	12.3	12,9a	13,4	12,2	12,7a	13,3	11,0	11,4b	11.9
Chuvoso-Seco	2022	48	9.4	10,3a	11,3	9,3	10,2a	11,0	8,6	9,1a	9.7
Seco	2022	38	12.6	13,5a	14,5	12,0	12,9a	13,7	10,5	11,2b	11.8
Seco-Chuvoso	2022	10	16.4	16,7a	16,9	15,3	15,6b	15,8	12,7	12,9c	13.1
Média		736	12.9	13,51a	14,16	12,40	13,00a	13,60	10,34	10,77b	11.2
							$R_n(d$	ia)			
Seco	2020	5	12.1	12,8a	13,4	11,1	11,7ab	12,3	8,5	8,9b	9.3
Seco-Chuvoso	2021	136	11.7	12,3a	12,8	10,8	11,3b	11,8	8,4	8,8c	9.3
Chuvoso	2021	73	11.3	12,0a	12,6	10,9	11,6a	12,2	8,8	9,3b	9.8
Chuvoso-Seco	2021	83	7.9	8,4a	8,8	7,6	8,0a	8,4	5,9	6,2b	6.5
Seco	2021	59	9	9,7a	10,4	8,5	9,2a	9,8	6,3	6,8b	7.2
Seco-Chuvoso	2021	74	12.5	13,0a	13,4	11,7	12,1a	12,5	8,6	9,0b	9.4
Chuvoso	2021	210	11	11,5a	12,1	10,8	11,3a	11,9	9,4	9,9b	10.3
Chuvoso-Seco	2022	48	7.8	8,5a	9,3	7,6	8,2ab	8,9	6,8	7,2b	7.7
Seco	2022	38	10.3	11,1a	11,9	9,5	10,2a	10,9	8,1	8,6b	9.2
Seco-Chuvoso	2022	10	13.2	13,5a	13,8	11,9	12,2b	12,5	9,5	9,7c	9.9
Média		736	10.7	11,27a	11,86	10,04	10,58b	11,13	8,03	8,45c	8.86
							G(+)				
Seco	2020	5	1.9	2,1ab	2,2	2,5	2,5a	2,6	1,4	1,5b	1.5
Seco-Chuvoso	2021	136	1.1	1,2a	1,4	0,7	0,9b	1,0	0,8	0,9b	0.9
Chuvoso	2021	73	0.4	0,6a	0,7	0,6	0,7a	0,9	0,6	0,7a	0.8
Chuvoso-Seco	2021	83	0.6	0,8b	0,9	1,2	1,4a	1,5	0,7	0,7b	0.8
Seco	2021	59	1.3	1,4b	1,6	1,6	1,8a	2,0	1,1	1,2c	1.3
Seco-Chuvoso	2021	74	1	1,3a	1,5	0,9	1,1a	1,4	1,2	1,3a	1.4
Chuvoso	2021	210	0.5	0,6ab	0,7	0,5	0,6b	0,7	0,7	0,8a	0.8
			0.7		1,3	0,9		1,4	1,0		1.3
Chuvoso-Seco	2022	48		1,0a			1,1a			1,2a	
Seco	2022	38	1.6	1,8a	2,1	1,6	1,8a	2,1	1,4	1,5b	1.7

Seco-Chuvoso	2022	10	2.2	2,3a	2,4	2,3	2,3a	2,4	1,6	1,6b	1.7
Média		736	1.14	1,31a	1,49	1,28	1,43ab	1,58	1,04	1,13b	1.22
							G(d	ia)			
Seco	2020	5	0.4	0,6ab	0,8	0,9	1,0a	1,1	0,5	0,6b	0.7
Seco-Chuvoso	2021	136	0.1	0,2a	0,4	-0,2	-0,1b	0,0	-0,1	0,0b	0.1
Chuvoso	2021	73	-0.4	-0,2a	-0,1	-0,2	-0,1a	0,0	-0,4	-0,3a	-0.2
Chuvoso-Seco	2021	83	-0.2	0,0b	0,1	0,4	0,5a	0,7	0,0	0,1b	0.1
Seco	2021	59	0.2	0,4b	0,5	0,6	0,7a	0,9	0,3	0,4b	0.5
Seco-Chuvoso	2021	74	0	0,2a	0,4	-0,1	0,1a	0,3	0,0	0,2a	0.3
Chuvoso	2021	210	-0.3	-0,2a	-0,1	-0,3	-0,2a	-0,1	-0,1	-0,1a	0
Chuvoso-Seco	2022	48	-0.2	0,0b	0,2	0,1	0,3ab	0,5	0,2	0,4a	0.5
Seco	2022	38	0.4	0,6a	0,8	0,6	0,8a	1,0	0,6	0,7a	0.9
Seco-Chuvoso	2022	10	0.6	0,8b	1,0	0,9	1,0a	1,1	0,7	0,7b	0.8
Média		736	0.09	0,24a	0,40	0,27	0,41a	0,55	0,17	0,27a	0.38
							LE(+)				
Seco	2020	5	1	1,3ab	1,5	1,0	1,7a	2,4	0,6	0,9b	1.2
Seco-Chuvoso	2021	136	2.4	2,9b	3,3	3,2	3,7a	4,1	2,5	2,9b	3.4
Chuvoso	2021	73	4.2	5,0a	5,8	4,0	4,5a	5,0	4,7	5,4a	6
Chuvoso-Seco	2021	83	1.8	2,0a	2,3	1,3	1,5b	1,7	1,5	1,8b	2.2
Seco	2021	59	1.7	1,8a	1,9	1,1	1,2b	1,4	0,7	0,8c	1
Seco-Chuvoso	2021	74	2	2,4ab	2,8	2,7	3,3a	3,9	1,9	2,5b	3.2
Chuvoso	2021	210	4.8	5,0a	5,3	5,3	5,7a	6,2	4,1	4,5b	4.8
Chuvoso-Seco	2022	48	3.2	3,5a	3,9	2,2	2,5b	2,9	2,0	2,3b	2.5
Seco	2022	38	2	2,2a	2,5	1,3	1,5b	1,7	1,6	1,8b	2.1
Seco-Chuvoso	2022	10	1.5	1,6a	1,8	0,9	1,1b	1,3	0,4	0,9b	1.4
Média		736	2.45	2,77a	3,10	2,31	2,68a	3,05	1,99b	2,38	2.77
							Н(-	+)			
Seco	2020	5	12.2	12,7a	13,2	10,7	11,0ab	11,3	9,4	9,6b	9.9
Seco-Chuvoso	2021	136	9.8	10,4a	10,9	8,8	9,2b	9,6	6,9	7,3c	7.7
Chuvoso	2021	73	7.7	8,5a	9,3	7,5	8,0a	8,5	4,5	5,0b	5.5
Chuvoso-Seco	2021	83	7	7,4a	7,9	6,9	7,2a	7,5	5,2	5,6b	6
Seco	2021	59	8.5	9,1a	9,7	8,3	8,9a	9,4	6,9	7,4b	7.8
Seco-Chuvoso	2021	74	11	11,5a	12,0	9,6	10,0b	10,5	7,1	7,5c	8
Chuvoso	2021	210	6.9	7,2a	7,6	6,2	6,5b	6,8	5,8	6,1b	6.5
Chuvoso-Seco	2022	48	5.1	5,8a	6,6	5,8	6,5a	7,2	5,2	5,7a	6.2
Seco	2022	38	8.6	9,4a	10,3	8,9	9,6a	10,3	7,3	7,9b	8.5
Seco-Chuvoso	2022	10	12.4	12,7a	13,0	11,9	12,2a	12,5	9,9	10,4b	10.9

474

475

476

477

478

479

480

481

482

483

484

485

486

487

O déficit de pressão de vapor no geral apresentou variações de 0,30 a 2,81 kPa na CAA, 0,23 a 3,01 kPa na REGE e 0,30 a 2,85 kPa na DEFA (Figura 5B, 5D e 5F). Observamos menores valores ao amanhecer com média de 1,38 kPa para CAA, 1,37 kPa para REGE e 1,36 kPa para DEFA, registrando os maiores valores às 12:00 horas da manhã (horário local) (Figura 5B, 5D e 5F). A β na CAA e REGE apresenta variações uniformes, com aumento gradual ao longo do dia, obtendo pico de valores a partir das 10:00 horas da manhã (horário local) (Figura 5B e 5D). Na CAA os valores médios da β variaram de -3,18 a 10,00, com média para os dois anos avaliados de 2,12, enquanto em REGE os valores médios variaram de 0,17 a 10,85, com média de 3,16. Por outro lado, observa-se que β *na* DEFA flutuou muito ao longo do dia em relação a CAA e REGE, com valores entre -9,45 e 6,50 e média de -0,17 (Figura 5F, Tabela 8).

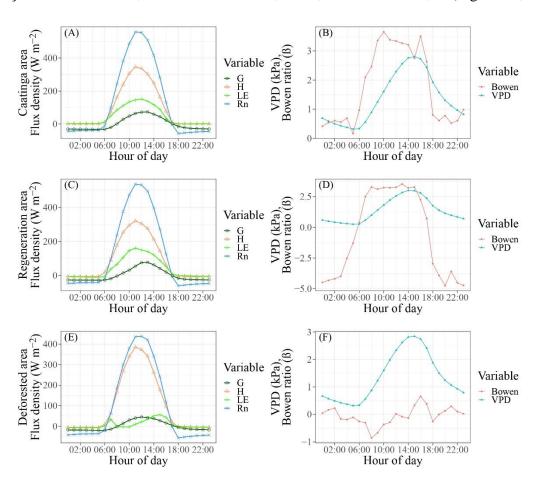


Figura 5. Ciclo horário dos fluxos de energia: radiação líquida (R_n), fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor no solo (G), razão de Bowen (β) e déficit de pressão de vapor (VPD) para as áreas de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA).

A partição do balanço energia é dada pela razão dos fluxos de calor latente (LE), calor sensível (H) e calor no solo (G) em função da radiação líquida (R_n), de tal modo que na CAA 28% da Rn foi direcionada para o LE, 66% para o H e 6% para o G. Em contraste, na REGE 28% da R_n compôs o LE, 64% para o H e 8% para o G, enquanto para DEFA 28% foi para o LE, 62% para o H e 9% para o G. Deste modo, a partição LE/R_n foi maior durante seca e as transições chuvosa-seca e seca-chuvosa para CAA (p<0,05) (Tabela 7); chuvosa para REGE e para DEFA, enquanto para H/R_n maiores médias foram observadas durante as estações seca e chuvosa e as transições chuvosa-seca e seca-chuvosa para DEFA com valores que oscilaram entre 0,72 a 0,80, de modo semelhante para CAA maiores médias foram observadas durante regimes estação chuvosa e a transição chuvosa-seca com médias entre 0,55 a 0,73, enquanto para REGE foi ao estação seca e transição chuvosa-seca com média entre 0,63 a 0,74. Para G/R_n não houve diferença significativa para a última estação seca entre as superfícies, no entanto, REGE apresentou valores superiores para a estação seca e as transições chuvosa-seca e secachuvosa de modo semelhante DEFA obteve maiores médias para a transição seca-chuvosa e a estação chuvosa, mas em períodos diferentes, enquanto para a CAA apenas a transição secachuvosa apresentou maiores médias em relação as demais superfícies.

504505

506

507

508

509

488

489

490

491

492

493

494

495

496

497

498

499

500

501

502

503

Tabela 7. Partição da radiação líquida dissipada em fluxo de calor latente (LE/R_n , MJ m⁻² dia⁻¹), fluxo de calor sensível (H/R_n , MJ m⁻² dia⁻¹) e fluxo de calor no solo (G/R_n , MJ m⁻² dia⁻¹) para os sítios de Caatinga (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA), situados no munícipio de Floresta, região central do estado de Pernambuco, Sertão central do Brasil.

Estações	Ano	n	α	μ	1-α	α	μ	1-α	α	μ	1-α
			CA	A			DEFA			REGE	
						LE/	R_n				
Seca	2020	5	0,07	0,08a	0,09	0,07	0,11a	0,15	0,05	0,08a	0,10
Seco-Chuvoso	2020	136	0,17	0,20b	0,23	0,24	0,26a	0,29	0,22	0,25ab	0,29
Seca-Chuvosa	2021	73	0,30	0,35b	0,40	0,30	0,34b	0,37	0,43	0,48a	0,53
Chuvosa	2021	83	0,18	0,20a	0,23	0,13	0,15b	0,17	0,19	0,23b	0,28
Chuvosa-Seca	2021	59	0,14	0,15a	0,16	0,10	0,11b	0,12	0,07	0,10c	0,12
Seca	2021	74	0,13	0,16b	0,19	0,19	0,23a	0,27	0,16	0,20ab	0,25
Seca-Chuvosa	2021	210	0,40	0,42b	0,44	0,42	0,44a	0,46	0,36	0,39b	0,41
Chuvosa	2022	48	0,33	0,39a	0,45	0,23	0,28b	0,33	0,23	0,27b	0,30
Chuvosa-Seca	2022	38	0,15	0,18a	0,21	0,10	0,12b	0,15	0,14	0,17a	0,20
Seca	2022	10	0,09	0,10a	0,11	0,06	0,07b	0,08	0,02	0,06b	0,10
Média		736	0,20	0,22a	0,25	0,18	0,21a	0,24	0,19	0,22a	0,26
						H/R_n					
Seca	2020	0,78	0,79ab	0,80	0,69	0,72b	0,76	0,78	0,80a	0,83	0,78
Seca-Chuvosa	2020	0,70	0,73a	0,75	0,66	0,68b	0,70	0,64	0,67b	0,70	0,70
Chuvosa	2021	0,56	0,61a	0,66	0,59	0,61a	0,64	0,41	0,46b	0,51	0,56
Chuvosa-Seca	2021	0,71	0,73a	0,76	0,71	0,72a	0,74	0,64	0,68a	0,72	0,71
Seca	2021	0,73	0,74b	0,75	0,74	0,75b	0,76	0,76	0,78a	0,80	0,73
Seca-Chuvosa	2021	0,74	0,76a	0,78	0,67	0,70b	0,72	0,61	0,66b	0,70	0,74
Chuvosa	2021	0,54	0,55a	0,57	0,50	0,52b	0,54	0,52	0,55a	0,57	0,54
Chuvosa-Seca	2022	0,51	0,54b	0,57	0,59	0,63a	0,66	0,58	0,61a	0,64	0,51
Seca	2022	0,67	0,69b	0,71	0,72	0,74a	0,75	0,67	0,70b	0,72	0,67
Seca-Chuvosa	2022	0,75	0,76b	0,77	0,77	0,78ab	0,79	0,54	0,72a	0,91	0,75
Média		0,67	0,69a	0,71	0,66	0,69a	0,71	0,62	0,66a	0,71	0,67
						G/R_n					
Seca	2020	0,12	0,13ab	0,14	0,16	0,17a	0,17	0,12	0,12b	0,13	0,12
Seca-Chuvosa	2020	0,06	0,07a	0,09	0,05	0,06b	0,07	0,07	0,08a	0,08	0,06
Chuvosa	2021	0,03	0,04a	0,06	0,04	0,05a	0,06	0,05	0,06a	0,07	0,03
Chuvosa-Seca	2021	0,05	0,07b	0,08	0,11	0,13a	0,14	0,08	0,09b	0,10	0,05
Seca	2021	0,10	0,11b	0,12	0,14	0,14a	0,15	0,12	0,12b	0,13	0,10
Seca-Chuvosa	2021	0,06	0,08b	0,09	0,06	0,07b	0,09	0,11	0,11a	0,12	0,06
Chuvosa	2021	0,01	0,03b	0,04	0,03	0,04b	0,05	0,06	0,07a	0,07	0,01
Chuvosa-Seca	2022	0,04	0,07b	0,10	0,07	0,10ab	0,12	0,11	0,12a	0,13	0,04
Seca	2022	0,11	0,13	0,15	0,12	0,14	0,15	0,12	0,13	0,14	0,11
Seca-Chuvosa	2022	0,13	0,14a	0,15	0,15	0,15a	0,15	0,12	0,13b	0,13	0,13
Média		0,07	0,09b	0,10	0,09	0,10ab	0,12	0,10	0,10a	0,11	0,07

Média (μ) na horizontal seguidas pela mesma letra, dentro da mesma estação não se diferem entre si ao nível de significância ($\alpha < 0.05$) pelo teste não paramétrico de Dunn (comparação entre K amostras). α , 1- α – indicam o intervalo de confiança.

510

511

512

513

514

515

516

517

518

519

520

521

522

523

524

525

A Figura 6 mostra as variações mensais dos valores médios (Figura 6A-D) de 10 minutos do balanço de energia: radiação líquida (R_n) , fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor no solo (G), além da evapotranspiração (ET) (Figura 6E) para os três sítios experimentais (CAA, REGE e DEFA) entre outubro de 2020 a outubro de 2022. O LE médio para CAA, REGE e DEFA foi de 3,41 MJ m⁻² dia⁻¹, 3,63 MJ m⁻² dia⁻¹ e 3,11 MJ m⁻² dia⁻¹, respectivamente. Para o período de maio a setembro de 2021 foi observado os menores valores de *LE* (Figura 6B). O *H* variou de -0,11 a 16,22 MJ m⁻² dia⁻¹ na CAA, 1,55 a 14,17 MJ m⁻² dia na REGE e 0,03 a 12,69 MJ m⁻² dia⁻¹ na DEFA. Como consequência, as médias foram de 8,67 MJ m⁻² dia⁻¹ para CAA, 8,04 MJ m⁻² dia⁻¹ para REGE, e 6,55 MJ m⁻² dia⁻¹ para DEFA, demonstrando que o H total foi maior que 60% do R_n total (Figura 6C). O G apresentou médias da seguinte ordem, 0,99 MJ m⁻² dia⁻¹, 1,06 MJ m⁻² dia⁻¹ e 0,94 MJ m⁻² dia⁻¹ para CAA, REGE e DEFA, respectivamente (Figura 6D). A ET seguiu o mesmo comportamento sazonal do LE, atingindo valores máximos diários de 3,74 mm dia⁻¹ na CAA, 5,18 mm dia⁻¹ na REGE e 4,98 mm dia⁻¹ na DEFA, com médias de 1,27 mm dia⁻¹, 1,54 mm dia⁻¹ e 0,83 mm dia⁻¹ para CAA, REGE e DEFA, respectivamente, com picos entre os meses de dezembro a abril que corresponde ao período de maior disponibilidade hídrica na região.

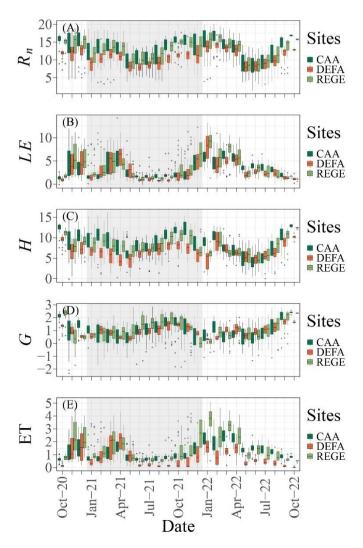


Figura 6. Boxplots mensais da radiação líquida (R_n), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor no solo (G) e evapotranspiração (ET) para os sítios experimentais de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA) entre os anos de 2020 e 2022.

Houve mudanças sazonais na *Rn*, *LE*, *H*, *G* e *ET* e flutuações semelhantes para as três paisagens (Figura 7). Durante a estação de crescimento (estação chuvosa) o *R_n* médio foi maior na CAA (11,63 MJ m⁻² dia⁻¹) e menor na DEFA (9,72 MJ m⁻² dia⁻¹) (Figura 7, Tabela 6). O maior *LE* foi obtido na REGE (5,7 MJ m⁻² dia⁻¹), com reduções na CAA (5,0 MJ m⁻² dia⁻¹) e DEFA (4,5 MJ m⁻² dia⁻¹) (Tabela 2, p<0,05). Curiosamente, o *H* médio foi maior durante a a transição seca-chuvosa, com maiores valores na CAA (12,07 MJ m⁻² dia⁻¹) e REGE (12,02 MJ m⁻² dia⁻¹). Os valores de *G* foram maiores durante a estação seca, sendo 1,61 MJ m⁻² dia⁻¹ na CAA, 1,85 MJ m⁻² dia⁻¹ em REGE e 1,32 MJ m⁻² dia⁻¹ na DEFA, com reduções de 63%, 67% e 44% durante o período chuvoso para CAA, REGE e DEFA, respectivamente. A ET por sua

vez, obteve menores valores durante a estação seca e maiores na estação de crescimento (estação chuvosa), como já era esperado, com valores médios de 1,82 mm dia ⁻¹ para CAA, 2,26 mm dia ⁻¹ para REGE e 1,25 mm dia ⁻¹ para DEFA, seguindo o mesmo padrão do *LE* uma vez que estes componentes respondem a disponibilidade de água no solo.

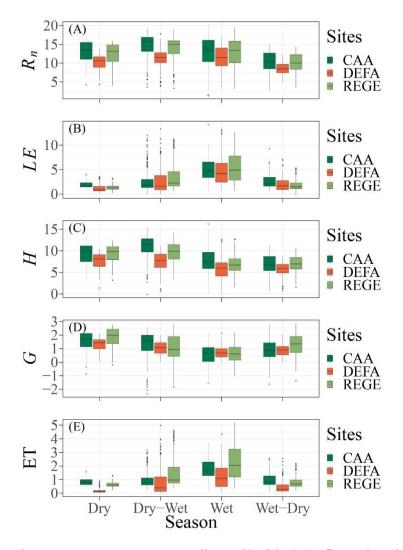


Figura 7. Boxplots entre estações para a radiação líquida (R_n), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor no solo (G) e evapotranspiração (ET) dos sítios experimentais de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA) entre os anos de 2020 e 2022.

3.3. Umidade volumétrica do solo, evapotranspiração e razão de Bowen

Quanto a umidade volumétrica do solo, evapotranspiração (ET) e a razão de Bowen, estes foram estatisticamente significativos entre as superfícies e as estações pelo teste de Dunn (p<0,05) (Tabela 8). A umidade volumétrica mostrou-se estatisticamente superior em todas as

estações e transições para REGE em relação as outras superfícies avaliadas, sendo que CAA obteve os menores valores de umidade entre os períodos de transição. A ET por sua vez, variou entre 0,61 a 1,92 mm dia⁻¹ para CAA, 0,54 a 1,91 mm dia⁻¹ para REGE e 0,17 a 1,90 mm dia⁻¹ para DEFA. De modo que os maiores valores para CAA ocorreram durante as estações de transição seca-chuvosa (2021), seca-chuvosa (2022) e a estação seca (2021 e 2022), enquanto na REGE obteve-se maiores médias para as estações chuvosa (2021), e transição seca-chuvosa (2021). A DEFA por sua vez, obteve valores inferiores em todos os regimes e transições. Para os valores da razão de Bowen (β), DEFA apresentou os maiores valores, principalmente durante a estação seca, enquanto para CAA maiores valores foram observados na estação chuvosa (2021) e a estação chuvosa (2021), e os menores valores foram observados na REGE.

Tabela 8. Umidade volumétrica do solo (θ), evapotranspiração (ET) e razão de Bowen (β) em função dos regimes hídricos, para os sítios de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA), situados no munícipio de Floresta, região central do estado de Pernambuco, Sertão central do Brasil.

Estações	Ano	n	α	μ	1-α	α	μ	1-α	α	μ	1-α
				CAA			REGE			DEFA	
							θ				
Seca	2020	5	0,05	0,05b	0,05	0,10	0,10a	0,10	0,06	0,06ab	0,06
Seca-Chuvosa	2020	136	0,07	0,08c	0,08	0,13	0,14a	0,15	0,09	0,10b	0,11
Chuvosa	2021	73	0,08	0,09b	0,09	0,15	0,17a	0,18	0,13	0,14a	0,15
Chuvosa-Seca	2021	83	0,06	0,06c	0,07	0,11	0,11a	0,12	0,08	0,08b	0,08
Seca	2021	59	0,05	0,05c	0,05	0,09	0,09a	0,10	0,06	0,06b	0,06
Seca-Chuvosa	2021	74	0,06	0,07c	0,08	0,11	0,12a	0,13	0,08	0,09b	0,10
Chuvosa	2021	210	0,12	0,13c	0,13	0,17	0,18a	0,19	0,13	0,14b	0,15
Chuvosa-Seca	2022	48	0,08	0,08b	0,09	0,12	0,12a	0,12	0,09	0,09b	0,09
Seca	2022	38	0,06	0,06b	0,06	0,11	0,11a	0,11	0,07	0,08c	0,08
Seca-Chuvosa	2022	10	0,06	0,06c	0,06	0,10	0,10b	0,10	0,07	0,07a	0,07
Média		736	0,07	0,07c	0,08	0,12	0,12a	0,13	0,09	0,09b	0,10
						E'	T				
Seca	2020	5	0,50	0,61a	0,72	0,52	0,77a	1,01	0,08	0,17b	0,25
Seca-Chuvosa	2020	136	0,89	1,01b	1,13	1,38	1,56a	1,74	0,80	0,98c	1,15
Chuvosa	2021	73	1,27	1,44b	1,61	1,71	1,91a	2,11	1,66	1,90a	2,14
Chuvosa-Seca	2021	83	0,65	0,72a	0,79	0,61	0,69a	0,77	0,39	0,51b	0,63
Seca	2021	59	0,70	0,75a	0,80	0,55	0,60b	0,65	0,10	0,14c	0,18
Seca-Chuvosa	2021	74	0,85	0,95a	1,05	1,19	1,43a	1,67	0,45	0,69b	0,93
Chuvosa	2021	210	1,83	1,92a	2,02	2,21	2,39a	2,56	0,90	1,00b	1,10
Chuvosa-Seca	2022	48	1,28	1,40a	1,53	0,92	1,06b	1,21	0,35	0,44c	0,52
Seca	2022	38	0,86	0,96a	1,05	0,61	0,68b	0,76	0,18	0,24c	0,30
Seca-Chuvosa	2022	10	0,80	0,90a	1,00	0,48	0,54b	0,60	0,00	0,04b	0,07
Média		736	0,96	1,07a	1,17	1,02	1,16a	1,31	0,49	0,61b	0,73
							β				
Seca	2020	5	8,10	10,14a	12,17	4,14	7,05a	9,96	7,49	11,24a	14,98
Seca-Chuvosa	2020	136	5,31	7,14a	8,97	3,36	3,77b	4,18	4,56	5,38b	6,21
Chuvosa	2021	73	1,74	3,66a	5,58	2,03	2,45a	2,88	1,22	1,63b	2,03
Chuvosa-Seca	2021	83	3,98	4,34b	4,71	4,62	5,88a	7,15	4,84	5,68ab	6,53
Seca	2021	59	4,90	5,33c	5,75	7,24	8,75b	10,26	9,94	11,82a	13,69
Seca-Chuvosa	2021	74	6,64	10,68ab	14,72	4,25	4,97b	5,70	10,77	25,90a	62,57
Chuvosa	2021	210	1,48	1,61b	1,75	1,47	1,67ab	1,87	1,78	2,01a	2,25
Chuvosa-Seca	2022	48	1,51	1,95b	2,38	2,81a	3,51	4,22	1,73	3,93a	6,12
Seca	2022	38	4,09	5,54b	6,99	6,34	7,45a	8,57	4,33	5,43b	6,53
Seca-Chuvosa	2022	10	7,06	7,99b	8,92	9,14	11,86a	14,57	6,77	21,56a	36,34
Média		736	3,83a	4,43	5,03	3,82	4,11a	4,40	3,29	6,76a	10,24

Média (μ) na horizontal seguidas pela mesma letra, dentro da mesma estação não se diferem entre si ao nível de significância (α < 0,05) pelo teste não paramétrico de Dunn (comparação entre K amostras). α , 1- α – indicam o intervalo de confiança.

3.4. Análise de componentes principais (PCA)

568

569

570

571

572

573

574

575

576

577

578

579

580

581

582

583

584

585

A Figura 8 apresenta a análise de componentes principais (PCA). Na CAA, dois componentes foram suficientes para explicar 68,4% da variância total dos dados, com o componente principal 1 (PC1) e o componente principal 2 (PC2) respondendo por 50,9% e 17,5%, respectivamente (Figura 8A). Por outro lado, na REGE os dois componentes principais explicaram 71% da variação total, sendo 47,8% do (PC1 e 23,2% do PC2 (Figura 8B), enquanto na DEFA, quando somados, os dois componentes principais foram capazes de explicar 63,5% da variabilidade dos dados, com 42,8% e 20,7% para PC1 e PC2, respectivamente (Figura 8C). Na CAA percebe-se que PC1 contribuiu mais para a resposta das variáveis micrometeorológicas durante as estações secas e a transição seca-chuvosa, assim há uma correlação positiva entre o VPD, G, Tair, H, ET, R_g , R_n e Bowen ration. Por outro lado, as variáveis correlacionadas positivamente pela PC2 estiveram relacionadas com a maior disponibilidade hídrica, sendo elas o NDVI, RH, chuva, umidade volumétrica do solo e LE. De modo semelhante à CAA e REGE na PC1 tiveram pesos positivos em função das estações secas e da transição seca-chuvosa para as variáveis Bowen ration, G, H, VPD, Tair, ET, R_g e R_n , enquanto na PC2 a correlação positiva foi RH, chuva, LE e NDVI. Na DEFA, por sua vez, na PC1 as variáveis G, H, VPD, Tair, ET, R_g e R_n foram correlacionadas positivamente e na PC2 NDVI, RH, chuva, Bowen ration umidade volumétrica do solo e LE tiveram correlação positiva entre si.

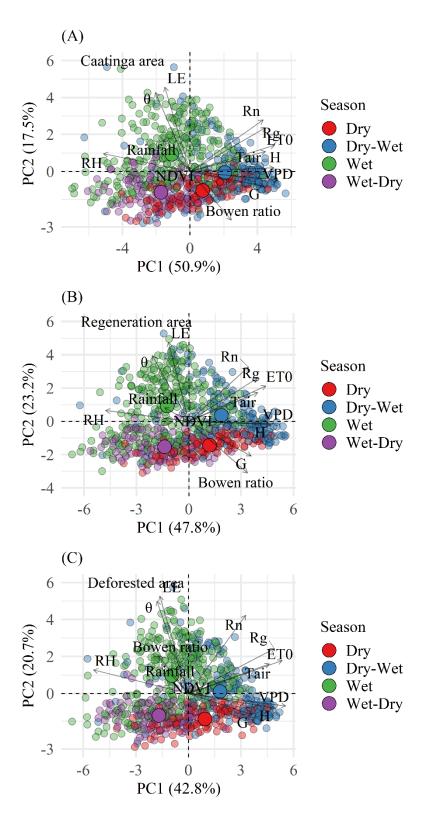


Figura 8. Análise de componentes principais (PCA) das variáveis micrometeorológicas (Umidade relativa do ar – RH; temperatura do ar (Tair), déficit de pressão de vapor – VPD e evapotranspiração – ET); do balanço de energia (R_n – radiação líquida; fluxo de calor latente – LE; fluxo de calor sensível – H, fluxo de calor no solo e razão de Bowen (β); umidade

590 volumétrica do solo (θ) e NDVI em função dos regimes hídricos (seco e chuvoso) e suas transições (seco-chuvoso e chuvoso-seco) para as áreas de Caatinga preservada (CAA),

Caatinga em regeneração (REGE) e área desmatada (DEFA).

593

594

595

596

597

598

599

600

601

602

603

604

605

606

607

608

609

610

611

612

613

614

615

616

617

618

619

620

621

622

591

592

4. DISCUSSÃO

4.1. Sazonalidade do balanço de energia sobre áreas de Caatinga com diferentes graus de mudança do uso da terra

As relações entre os fatores ambientais e os componentes do balanço de energia favorecem o entendimento dos efeitos da mudança no uso e cobertura da terra. Nesse estudo, foi avaliando como a mudança no uso da terra modifica as interações entre a superfícieatmosfera em três ecossistemas de Caatinga com diferentes graus de cobertura vegetal. A vegetação desempenha um papel importante nas interações terra-atmosfera a partir de características biofísicas radioativas (albedo) e não radioativas (rugosidade da superfície e Bowen ratio) (Burakowski et al., 2018). Em ecossistemas semiáridos, nota-se que existe uma correlação linear negativa significativa entre a cobertura vegetal e o albedo (Bright et al., 2015; Tian et al., 2017). De modo geral, áreas desmatadas apresentam maior albedo quando comparada as áreas florestadas (Burakowski et al., 2018), resultando em menor R_n como observado em DEFA (8,45 MJ m⁻² dia⁻¹) que obteve menor R_n em relação a CAA (11,27 MJ m⁻¹ ² dia⁻¹) (Tabela 5). Embora o albedo não tenha sido avaliado neste estudo, ele tende a ser maior devido à secura da superfície, ao solo exposto e à ausência de vegetação fotossinteticamente ativa (Yue et al., 2019). Isso porque durante o dia a R_n é dominada pelas mudanças de radiação de ondas curtas fazendo com que estas superfícies acumulem menos radiação, promovendo menores valores de R_n e temperatura em relação a superfície vegetadas (Tabela 5) (Santos et a., 2011; Burakowski et al., 2018; Yue et al., 2019). A R_n é uma variável que interage com as características espectrais da superfície (Rodrigues et al., 2009) e florestas a exemplo da Caatinga, além do menor albedo superficial, tem maior umidade e índice de área foliar em relação a áreas desmatadas o que permite maior absorção da luz solar (Santos et al., 2011). Outro fator que determina maiores valores de R_n em áreas florestadas é que estas tem maior biomassa, reduzindo a temperatura do dossel e a emissão de ondas longas através do dossel (Borges et al., 2020). Logo, o menor R_n em DEFA pode ser atribuído ao solo exposto e a ausência de vegetação.

No presente estudo, a chuva foi a única fonte de umidade do solo, logo, a partição de energia foi sensível as mudanças na disponibilidade hídrica para os ecossistemas avaliados, desta forma, cerca de 90% da radiação líquida foi consumida pelos fluxos de *LE* e *H*. As mudanças no *LE* foram afetadas pela Tair, RH, VPD, θ e ET (Chen et al., 2022). A disponibilidade de água no solo (θ) associada com o crescimento da vegetação é uma das principais razões para os aumentos em *LE* (Chen et al., 2022). No entanto, o *LE* permaneceu inferior durante a estação seca e chuvosa em ambas as paisagens, resultando em maior energia retornando para a atmosfera como calor sensível (Silva et al., 2017; Alves et al., 2023). A diminuição do conteúdo de água no solo durante a estação seca e alto *VPD* promovem a diminuição do *LE* (Chen et al., 2022). Em condições de baixa disponibilidade hídrica, o ar acima do dossel tende a receber mais calor ao invés de vapor d'água, promovendo camadas de ar mais quentes (Teixeira et al., 2008). Souza et al. (2023) encontraram resultados semelhantes em diferentes paisagens na Caatinga. Outro fator é que os baixos valores de *LE* observados na Caatinga podem estar associados ao mecanismo de defesa da vegetação, em função da perda de folhas, que pode ser identificado a partir de índices de vegetação, a exemplo do NDVI (Salvatierra et al., 2017; Silva et al., 2021).

Além disso, os picos de *LE* são equivalentes ao aumento da evapotranspiração (ET) para as estações chuvosas e transições seca-chuvosa. Contudo, com a diminuição dos eventos de chuva e, consequentemente, da disponibilidade de água no solo houve uma redução de 30%, 56% e 48% no *LE* para CAA, REGE e DEFA na estação chuvosa (2021) para a transição chuvosa-seca (Tabela 5). Além disso, os menores valores de *LE* foram observados durante a estação seca (2020) para CAA e DEFA, e durante a transição seca-chuvosa (2022) para REGE (Tabela 6). Esta redução em função da umidade do solo, faz com que grandes quantidades de calor disponível seja utilizado para o aquecimento do ar (*H*). Evidenciando a relação de *LE* com a disponibilidade de água no solo é confirmada (Souza et al., 2015; Borges et al., 2020; Yue et al., 2019).

Neste trabalho, percebe-se que a troca de energia no sistema superfície-atmosfera para os três sítios teve *H* como fluxo de energia dominante, sendo 66% para CAA, 63% para REGE e 62% na DEFA (Figura 6). De modo que os maiores valores de *H* foram observados na transição seco-chuvosa (2022) em ambas as áreas. Em ambientes áridos e semiáridos é comum a maior utilização da energia disponível para o aquecimento da atmosfera através do *H* nos ecossistemas naturais, considerando que estes locais são marcados pela baixa disponibilidade hídrica no sistema solo-atmosfera em virtude dos baixos índices pluviométricos ocorrentes (Santos et al., 2012; Teixeira et al., 2008; Silva et al., 2017; Souza et al., 2015; Campos et al.,

2019; Borges et al., 2020). Nessas condições, o ar úmido é retirado dos processos advectivos, tornando-o o ambiente mais seco (Souza et al., 2023).

Foram observados aumentos de 35%, 25% e 50% para o *H* na CAA, REGE e DEFA com a mudança da estação chuvosa para a estação seca. O aumento nos fluxos de *H* e *G* com a redução da chuva, umidade do solo e cobertura vegetal ocorreram em virtude dos dosséis mais esparsos e menor índice de área foliar, o que permite que maior quantidade de radiação solar atinja a superfície do solo. Desse modo, há um aumento na temperatura do ar, que a exemplo de áreas desmatadas facilita os processos convectivos e a remoção do ar úmido (Hardwick et al., 2015).

Como esperado, os maiores valores de *G* foram observados durante a estação seca, período em que ocorre a redução do conteúdo de água no solo e as espécies são submetidas ao déficit hídrico, característica da região juntamente com a senescência foliar deixando o solo mais exposto à incidência de radiação solar (Mendes et al., 2021). Assim, o fluxo de calor no solo na REGE foi 19% maior em relação à CAA durante a estação seca. Esse comportamento se explica pela cobertura vegetal na REGE ser menor, uma vez que esta área foi parcialmente desmatada e apresenta em sua composição herbáceas que surgem, principalmente, durante o período chuvoso. Assim, o desmatamento compromete a relação entre chuva e NDVI. Em áreas preservadas, como CAA, o NDVI responde suavemente a sazonalidade das chuvas permanecendo relativamente mais alto em condições mais secas, quando comparado a ambientes degradados (Silva et al., 2021). Os menores valores de G são observados durante a estação chuvosa, denominada também como estação de crescimento, a qual apresenta uma maior cobertura do solo pela vegetação da Caatinga (Santos et al., 2020; Silva et al., 2017).

O NDVI está intrinsecamente relacionada ao verdor da vegetação que é totalmente dependente do teor de água no solo, considerando que o crescimento da vegetação da Caatinga é totalmente dependente da disponibilidade hídrica local (Ivo et al., 2020). Devido a sua localidade geográfica, a Caatinga sofre forte sazonalidade e distribuição irregular das chuvas, o que pode comprometer na disponibilidade de água no solo, fenologia, condutância estomática e fotossíntese (Marques et al., 2020; Medeiros et al., 2022). Além disso, a chuva e a umidade do solo são os principais fatores ambientais que impulsionam as mudanças foliares na Caatinga (Medeiros et al., 2022). Como estratégia de sobrevivência ao déficit hídrico as árvores da Caatinga perdem suas folhas no início das estação seca com rebrota nos primeiros eventos de chuva (Santos et al., 2021). Assim, os meses com maior déficit hídrico apresentam menor cobertura foliar (Alberton et al., 2019; Machado et al., 1997; Medeiros et al., 2022). Os picos

de NDVI correspondem ao período de ocorrência de chuva, ou logo após eventos pontuais de chuva, quando há o desenvolvimento de novas folhas e aumento do índice de área foliar, com maiores valores observados na DEFA (0,64) durante a estação chuvosa em função da maior densidade de espécies herbáceas que ocorrem na área em função da maior disponibilidade de água no solo (Medeiros et al., 2022). A redução do NDVI durante a estação seca é uma resposta da vegetação ao déficit hídrico devido à caducifolia das espécies (Campos et al., 2019). Neste sentido, os aumentos observados em *LE* podem ser associado ao NDVI, pois ambos tendem a ser maiores na estação de crescimento que equivale ao período de maior disponibilidade de água no ambiente, da mesma forma que, durante a estação seca quando as plantas perdem suas folhas a partir da redução nos eventos de chuva o *LE* e o NDVI apresentam diminuição (Marques et al., 2020).

4.2. Evapotranspiração e razão de Bowen

689

690

691

692

693

694

695

696

697

698

699

700

701

702

703

704

705

706

707

708

709

710

711

712

713

714

715

716

717

718

719

720

721

Os diferentes níveis de cobertura vegetal promovem diferenças nas magnitudes da evapotranspiração, além das diferenças na variabilidade da umidade do solo (Sun et al., 2019). DEFA obteve os menores valores de ET independente do regime hídrico e, consequentemente, menor umidade do solo o que culminou em menor LE. A presença de vegetação ativa influencia na evapotranspiração e na umidade do solo, que por sua vez é extremamente importante para a transpiração das plantas (Sun et al., 2019). No entanto, a DEFA pelo nível de degradação e baixa biodiversidade favorece a redução da evapotranspiração devido ao aumento do albedo, diminuição na rugosidade superficial, além de conter uma menor índice de área foliar (Biudes et al., 2015; Sheil & Murdiyarso, 2009). Assim, reduções na ET estão tipicamente associadas a um aumento na temperatura da superfície, e do H (Biudes et al., 2015). Com a transição da estação chuvosa para estação seca há uma redução na ET em ambas as superfícies, com destaque para CAA e REGE (Figura 7) (Jardim et al., 2022b). Esta diminuição é devido a redução da abertura dos poros estomáticos que atua como mecanismo de defesa frente ao déficit hídrico pela redução da disponibilidade de água no solo e da transpiração (Flexas & Medrano, 2002). Salienta-se que com o fechamento estomático há uma diminuição na taxa fotossintética devido a menor absorção de CO₂, o que está associado a senescência foliar, uma das principais estratégias das planta da Caatinga frente ao déficit hídrico. Logo, menores valores de ET podem estar associados à diminuição do NDVI e índice de área foliar (Marques et al., 2020). Contudo, durante a estação chuvosa a ET na REGE foi 32 e 24% maior em relação a CAA para o ano de 2021, reflexo dos maiores valores de LE (Tabela 8). Em 2021 choveu um total acumulado de 504 mm na área em regeneração, enquanto na área de Caatinga choveu 447 mm, 19% a menos

que REGE o que permite maior disponibilidade hídrica no solo, favorecendo uma maior liberação de vapor d'água para a atmosfera (Borges et al., 2020). Contudo, além da composição lenhosa é possível observar uma quantidade maior de plantas herbáceas em REGE, as quais tem o ciclo de vida concentrado durante o período chuvoso, denominadas de herbáceas terófitas (Araújo et al., 2005). Portanto, a cobertura da terra e a disponibilidade de água são um dos principais fatores que afetam a ET, através do desmatamento, reflorestamento ou recuperação de pastagens (Li et al., 2017).

A razão de Bowen (β) é dada pela relação entre os fluxos H e LE, e sua variabilidade indica uma modificação na variação da capacidade evaporativa e de reflexão, que estão diretamente associados a mudança no uso e cobertura da terra (Deng et al., 2015). Além disso, a β desempenha um papel importante no balanço energético e nas propriedades biofísicas do ecossistema. Assim, seu efeito no aquecimento da energia disponível para o aquecimento do ar tem grande influência no microclima e no ciclo hidrológico dos ecossistemas (Tang et al., 2014). Os resultados da β na DEFA mostrou-se na maioria dos regimes hídricos < 1, ou seja, LE foi maior H (Chen et al., 2022; Campos et al., 2019), indicando que as condições são mais favoráveis para o desenvolvimento da vegetação. Ainda, DEFA há uma predominância de plantas herbáceas de raízes rasas, as quais contribuem para uma maior evaporação da água do solo (Giambelluca et al., 2009). Os valores da β na DEFA apresentaram média de -0,27, e na CAA e REGE foram de 2,72 e 3,16, respectivamente. De acordo com Chen et al. (2016) a alta variabilidade na β está relacionada com a variação do conteúdo de água no solo e da vegetação. Percebe-se que durante a estação de crescimento quando há um aumento no índice de área foliar os valores da β tendem a diminuir em relação aos períodos secos como observado em CAA e REGE. Por outro lado, os valores da β permaneceram > 1, ou seja, uma quantidade maior de energia está retornando para a atmosfera na forma de H demonstrando que a vegetação está sob condições de estresse hídrico devido à baixa disponibilidade de água (Tabela 8)) (Alves et al., 2022; Chen et al., 2022; Ping et al., 2018; Yue et al., 2019). Assim, durante a estação de crescimento, áreas florestadas costumam ter temperaturas de superfície mais baixa em função do resfriamento evaporativo o que resulta em um β mais alto (Burakowski et al., 2018).

5. CONCLUSÕES

722

723

724

725

726

727

728

729

730

731

732

733

734

735

736

737

738

739

740

741

742

743

744

745

746

747

748

749

750

751

752

753

754

O presente estudo mostrou que em ambos os anos e nos diferentes regimes hídricos a área desmatada obteve os menores valores para radiação líquida, principalmente na transição chuvosa-seca, como consequência das características da superfície, devido à presença de vegetação herbácea nas estações chuvosas e solo mais exposto na estação seca.

- A maior parte da energia disponível pela radiação líquida foi utilizada para o aquecimento do ar, pelo fluxo de calor sensível, enquanto o fluxo de calor latente apresentou pequenos aumentos durante a estação chuvosa, principalmente na área de Caatinga em regeneração. Esses resultados confirmam que em regiões marcadas pela baixa disponibilidade hídrica, como é o caso da Caatinga, a dinâmica do balanço de energia está intimamente relacionada a sazonalidade das chuvas, considerando que as características metabólicas e fisiológicas das plantas são induzidas principalmente pela disponibilidade hídrica no ecossistema.
 - Além disso, tanto as mudanças no uso e cobertura da terra como a disponibilidade hídrica promoveram alterações na evapotranspiração, com menores taxas durante a estação seca na área desmatada. Na estação chuvosa, quando as plantas estão com suas rotas metabólicas mais ativas, foram registradas as maiores taxas da evapotranspiração na área de Caatinga em regeneração. Assim, o presente estudo apresenta achados importantes para compreender como a mudança no uso da terra modulam o microclima e os componentes do balanço de energia, de modo que a mudança no uso e cobertura da terra promove alterações nos componentes do balanço de energia, evapotranspiração e β , os quais são sensíveis a disponibilidade de água no solo e ao tipo de vegetação presente.

6. REFERÊNCIAS

755

756

757

758

759

760

761

762

763

764

765

766

767

768

769

770

- Anav, A., Ruti, P. M., Artale, V., Valentini, R. (2010). Modelling the effects of land-cover
- changes on surface climate in the Mediterranean region. Climate Research, 41, 91–104.
- 774 https://doi.org/10.3354/cr00841
- Araújo, A. C., Dolman, A. J., Waterloo, M. J., Gash, J. H. C., Kruijt, B., Zanchi, F. B., de
- Lange, J. M. E., Stoevelaar, R., Manzi, A. O., Nobre, A. D., Lootens, R. N., & Backer, J.
- 777 (2010). The spatial variability of CO2 storage and the interpretation of eddy covariance
- fluxes in central Amazonia. Agricultural and Forest Meteorology, 150(2), 226–237.
- 779 https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2009.11.005
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Leonardo, J., Gonçalves, M., & Sparovek, G.
- 781 (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift,
- 782 22(6), 711–728. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507
- Alberton, B., Torres, R. da S., Silva, T. S. F., da Rocha, H. R., Moura, M. S. B., & Morellato,
- L. P. C. (2019). Leafing Patterns and Drivers across Seasonally Dry Tropical
- 785 Communities. Remote Sensing 2019, Vol. 11, Page 2267, 11(19), 2267.
- 786 https://doi.org/10.3390/RS11192267
- 787 Althoff, T. D., Menezes, R. S. C., Pinto, A. de S., Pareyn, F. G. C., Carvalho, A. L. de,

- Martins, J. C. R., de Carvalho, E. X., Silva, A. S. A. da, Dutra, E. D., & Sampaio, E. V.
- de S. B. (2018). Adaptation of the century model to simulate C and N dynamics of
- 790 Caating dry forest before and after deforestation. *Agriculture, Ecosystems &*
- 791 Environment, 254, 26–34. https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2017.11.016
- 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
- 794 *Meteorology*, 319, 108912. https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2022.108912
- Anav, A. R. P. M. A. V. V. R. (2010). Modelling the effects of land-cover changes onsurface
- climate in the Mediterranean region. *Climate Research*, 41, 91–104.
- 797 https://doi.org/10.3354/cr00841
- 798 Araújo, E. de L., da Silva, K. A., Ferraz, E. M. N., Sampaio, E. V. de S. B., & da Silva, S. I.
- 799 (2005). Diversidade de herbáceas em microhabitats rochoso, plano e ciliar em uma área
- de caatinga, Caruaru, PE, Brasil. Acta Botanica Brasilica, 19(2), 285–294.
- 801 https://doi.org/10.1590/S0102-33062005000200011
- 802 Bessa, M. C., Lacerda, C. F., Amorim, A. V., Bezerra, A. M. E., & Lima, A. D. (2017).
- Mechanisms of salt tolerance in seedlings of six woody native species of the Brazilian
- 804 semi-arid. Revista Ciencia Agronomica, 48(1), 157–165. https://doi.org/10.5935/1806-
- 805 6690.20170018
- 806 Biudes, M. S., Vourlitis, G. L., Machado, N. G., de Arruda, P. H. Z., Neves, G. A. R., de
- Almeida Lobo, F., Neale, C. M. U., & de Souza Nogueira, J. (2015). Patterns of energy
- exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil.
- 809 *Agricultural and Forest Meteorology*, 202, 112–124.
- 810 https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2014.12.008
- 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. (2020a). Seasonal variation of surface radiation and energy balances over two
- contrasting areas of the seasonally dry tropical forest (Caatinga) in the Brazilian semi-
- arid. Environmental Monitoring and Assessment, 192(8), 1–18.
- 816 https://doi.org/10.1007/S10661-020-08484-Y/TABLES/4
- 817 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. (2020b). Seasonal variation of surface radiation and energy balances over two
- contrasting areas of the seasonally dry tropical forest (Caatinga) in the Brazilian semi-

- arid. Environmental Monitoring and Assessment, 192(8), 1–18.
- 822 https://doi.org/10.1007/S10661-020-08484-Y/TABLES/4
- Bright, R. M., Zhao, K., Jackson, R. B., & Cherubini, F. (2015). Quantifying surface albedo
- and other direct biogeophysical climate forcings of forestry activities. *Global Change*
- 825 *Biology*, 21(9), 3246–3266. https://doi.org/10.1111/GCB.12951
- 826 Brito, N. D. da S., Medeiros, M. J. dos S., Souza, E. S. de, & Lima, A. L. A. de. (2022).
- Drought response strategies for deciduous species in the semiarid Caatinga derived from
- the interdependence of anatomical, phenological and bio-hydraulic attributes. *Flora*, 288,
- 829 152009. https://doi.org/10.1016/J.FLORA.2022.152009
- 830 Burakowski, E., Tawfik, A., Ouimette, A., Lepine, L., Novick, K., Ollinger, S., Zarzycki, C.,
- & Bonan, G. (2018). The role of surface roughness, albedo, and Bowen ratio on
- ecosystem energy balance in the Eastern United States. Agricultural and Forest
- 833 *Meteorology*, 249, 367–376. https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2017.11.030
- Caballero, C. B., Ruhoff, A., & Biggs, T. (2022). Land use and land cover changes and their
- impacts on surface-atmosphere interactions in Brazil: A systematic review. *Science of*
- 836 *The Total Environment*, 808, 152134.
- 837 https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.152134
- 838 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.
- 842 *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 398–412.
- 843 https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2019.03.018
- Chambers, J. Q., & Artaxo, P. (2017). Deforestation size influences rainfall. *Nature Climate*
- 845 Change 2017 7:3, 7(3), 175–176. https://doi.org/10.1038/NCLIMATE3238
- 846 Chen, J., Dong, G., Chen, J., Jiang, S., Qu, L., Legesse, T. G., Zhao, F., Tong, Q., Shao, C., &
- Han, X. (2022). Energy balance and partitioning over grasslands on the Mongolian
- Plateau. Ecological Indicators, 135, 108560.
- https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2022.108560
- 850 Chen, X., Yu, Y., Chen, J., Zhang, T., & Li, Z. (2016). Seasonal and interannual variation of
- radiation and energy fluxes over a rain-fed cropland in the semi-arid area of Loess
- Plateau, northwestern China. *Atmospheric Research*, 176–177, 240–253.
- https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2016.03.003

- 854 Coe, M. T., Costa, M. H., & Soares-Filho, B. S. (2009). The influence of historical and
- potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River Land surface
- processes and atmospheric feedbacks. *Journal of Hydrology*, 369(1–2), 165–174.
- 857 https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2009.02.043
- 858 Costa, C. A., Santos, D., Do Nascimento, R. L., Rao, T. V. R., & Manzi, A. O. (2011). Net
- radiation estimation under pasture and forest in Rondônia, Brazil, with TM Landsat 5
- 860 images. *Atmósfera*, 24(4), 435–446.
- http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-
- 862 62362011000400006&lng=es&nrm=iso&tlng=en
- 863 Cunha, A. P. M. A., Alvalá, R. C. S., Kubota, P. Y., & Vieira, R. M. S. P. (2015). Impacts of
- land use and land cover changes on the climate over Northeast Brazil. *Atmospheric*
- Science Letters, 16(3), 219–227. https://doi.org/10.1002/ASL2.543
- Deng, X., Shi, Q., Zhang, Q., Shi, C., & Yin, F. (2015). Impacts of land use and land cover
- changes on surface energy and water balance in the Heihe River Basin of China, 2000–
- 868 2010. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 79–82, 2–10.
- https://doi.org/10.1016/J.PCE.2015.01.002
- 870 Flexas, J., & Medrano, H. (2002). Drought-inhibition of Photosynthesis in C3 Plants:
- Stomatal and Non-stomatal Limitations Revisited. *Annals of Botany*, 89(2), 183–189.
- https://doi.org/10.1093/AOB/MCF027
- 673 Giambelluca, T. W., Scholz, F. G., Bucci, S. J., Meinzer, F. C., Goldstein, G., Hoffmann, W.
- A., Franco, A. C., & Buchert, M. P. (2009). Evapotranspiration and energy balance of
- Brazilian savannas with contrasting tree density. *Agricultural and Forest Meteorology*,
- 876 149(8), 1365–1376. https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2009.03.006
- Hardwick, S. R., Toumi, R., Pfeifer, M., Turner, E. C., Nilus, R., & Ewers, R. M. (2015). The
- relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm
- plantation: Forest disturbance drives changes in microclimate. *Agricultural and Forest*
- 880 *Meteorology*, 201, 187–195. https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2014.11.010
- Hu, S., Zhao, C., Li, J., Wang, F., & Chen, Y. (2014). Discussion and reassessment of the
- method used for accepting or rejecting data observed by a Bowen ratio system.
- 883 *Hydrological Processes*, 28(15), 4506–4510. https://doi.org/10.1002/HYP.9962
- Ivo, I. O., Biudes, M. S., Vourlitis, G. L., Machado, N. G., & Martim, C. C. (2020). Effect of
- fires on biophysical parameters, energy balance and evapotranspiration in a protected
- area in the Brazilian Cerrado. Remote Sensing Applications: Society and Environment,

- Jamiyansharav, K., Ojima, D., Pielke, R. A., Parton, W., Morgan, J., Beltrán-Przekurat, A.,
- LeCain, D., & Smith, D. (2011). Seasonal and interannual variability in surface energy
- partitioning and vegetation cover with grazing at shortgrass steppe. Journal of Arid
- 891 Environments, 75(4), 360–370. https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2010.11.008
- Jardim, A. M. da R. F., Araújo Júnior, G. D. N., da Silva, M. V., Dos Santos, A., da Silva, J.
- L. B., Pandorfi, H., de Oliveira-Júnior, J. F., Teixeira, A. H. de C., Teodoro, P. E., de
- Lima, J. L. M. P., da Silva Junior, C. A., de Souza, L. S. B., Silva, E. A., & da Silva, T.
- G. F. (2022a). Using Remote Sensing to Quantify the Joint Effects of Climate and Land
- Use/Land Cover Changes on the Caatinga Biome of Northeast Brazilian. *Remote*
- Sensing, 14(8), 1911. https://doi.org/10.3390/RS14081911/S1
- Jardim, A. M. da R. F., Araújo Júnior, G. D. N., da Silva, M. V., Dos Santos, A., da Silva, J.
- L. B., Pandorfi, H., de Oliveira-Júnior, J. F., Teixeira, A. H. de C., Teodoro, P. E., de
- Lima, J. L. M. P., da Silva Junior, C. A., de Souza, L. S. B., Silva, E. A., & da Silva, T.
- 901 G. F. (2022b). Using Remote Sensing to Quantify the Joint Effects of Climate and Land
- 902 Use/Land Cover Changes on the Caatinga Biome of Northeast Brazilian. *Remote*
- 903 Sensing, 14(8), 1911. https://doi.org/10.3390/RS14081911/S1
- Jardim, A. M. da R. F., Morais, José Edson Florentino de Souza, L. S. B. de, Souza, C. A. A.
- de, Araújo Junior, G. do N., Alves, C. P., Novaes, G. I. da S., Leite, R. M. C., Moura, M.
- 906 S. B. de, Lima, J. L. M. P., & Silva, T. G. F. (2023a). Monitoring Energy Balance,
- 907 Turbulent Flux Partitioning, Evapotranspiration and Biophysical Parameters of Nopalea
- cochenillifera (Cactaceae) in the Brazilian Semi-Arid Environment. *Plants 2023, Vol. 12*,
- 909 *Page 2562, 12*(13), 2562. https://doi.org/10.3390/PLANTS12132562
- 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. (2023b). 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,
- 915 104330. https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2023.104330
- 916 Jardim, A. M. da R. F., Silva, M. V. da, Silva, A. R., Santos, A. dos, Pandorfi, H., Oliveira-
- Júnior, J. F. de, de Lima, J. L. M. P., Souza, L. S. B. de, Araújo Júnior, G. do N., Lopes,
- P. M. O., Moura, G. B. de A., & Silva, T. G. F. da. (2021). Spatiotemporal climatic
- analysis in Pernambuco State, Northeast Brazil. Journal of Atmospheric and Solar-

- 920 *Terrestrial Physics*, 223, 105733. https://doi.org/10.1016/J.JASTP.2021.105733
- Li, G., Zhang, F., Jing, Y., Liu, Y., & Sun, G. (2017). Response of evapotranspiration to
- changes in land use and land cover and climate in China during 2001–2013. Science of
- 923 The Total Environment, 596–597, 256–265.
- 924 https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.04.080
- 925 Lima, A. L. A., de Sá Barretto Sampaio, E. V., de Castro, C. C., Rodal, M. J. N., Antonino, A.
- 926 C. D., & de Melo, A. L. (2012). Do the phenology and functional stem attributes of
- woody species allow for the identification of functional groups in the semiarid region of
- 928 Brazil? *Trees Structure and Function*, 26(5), 1605–1616.
- 929 https://doi.org/10.1007/S00468-012-0735-2
- 930 Machado, I. C. S., Barros, L. M., & Sampaio, E. V. S. B. (1997). Phenology of Caatinga
- 931 Species at Serra Talhada, PE, Northeastern Brazil. *Biotropica*, 29(1), 57–68.
- 932 https://doi.org/10.1111/J.1744-7429.1997.TB00006.X
- 933 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.
- 935 https://doi.org/10.1007/S00704-016-1840-8/FIGURES/9
- 936 Marques, T. V., Mendes, K., Mutti, P., Medeiros, S., Silva, L., Perez-Marin, A. M., Campos,
- 937 S., Lúcio, P. S., Lima, K., dos Reis, J., Ramos, T. M., da Silva, D. F., Oliveira, C. P.,
- Costa, G. B., Antonino, A. C. D., Menezes, R. S. C., Santos e Silva, C. M., & Bezerra, B.
- 939 (2020a). Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally
- Dry Tropical Forests (Caatinga) in the Brazilian Semiarid. *Agricultural and Forest*
- 941 *Meteorology*, 287(February 2019), 107957.
- 942 https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107957
- Marques, T. V., Mendes, K., Mutti, P., Medeiros, S., Silva, L., Perez-Marin, A. M., Campos,
- 944 S., Lúcio, P. S., Lima, K., dos Reis, J., Ramos, T. M., da Silva, D. F., Oliveira, C. P.,
- Costa, G. B., Antonino, A. C. D., Menezes, R. S. C., Santos e Silva, C. M., & Bezerra, B.
- 946 (2020b). Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally
- Dry Tropical Forests (Caatinga) in the Brazilian Semiarid. *Agricultural and Forest*
- 948 *Meteorology*, 287(March), 107957. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107957
- 949 Marques, T. V., Mendes, K., Mutti, P., Medeiros, S., Silva, L., Perez-Marin, A. M., Campos,
- 950 S., Lúcio, P. S., Lima, K., dos Reis, J., Ramos, T. M., da Silva, D. F., Oliveira, C. P.,
- Costa, G. B., Antonino, A. C. D., Menezes, R. S. C., Santos e Silva, C. M., & Bezerra, B.
- 952 (2020c). Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally

- 953 Dry Tropical Forests (Caatinga) in the Brazilian Semiarid. *Agricultural and Forest*
- 954 *Meteorology*, 287, 107957. https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2020.107957
- 955 Medeiros, R., Andrade, J., Ramos, D., Moura, M., Pérez-Marin, A. M., Dos Santos, C. A. C.,
- da Silva, B. B., & Cunha, J. (2022). Remote Sensing Phenology of the Brazilian
- Caatinga and Its Environmental Drivers. *Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 2637*,
- 958 14(11), 2637. https://doi.org/10.3390/RS14112637
- 959 Meir, P., Metcalfe, D. B., Costa, A. C. L., & Fisher, R. A. (2008). The fate of assimilated
- carbon during drought: impacts on respiration in Amazon rainforests. *Philosophical*
- 761 *Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1498), 1849–1855.
- 962 https://doi.org/10.1098/RSTB.2007.0021
- 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.,
- Marenco, 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.
- 969 https://doi.org/10.3390/F12010086
- 970 Oliveira, L. J. C., Costa, M. H., Soares-Filho, B. S., & Coe, M. T. (2013). Large-scale
- expansion of agriculture in Amazonia may be a no-win scenario. *Environmental*
- 972 Research Letters, 8(2), 024021. https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024021
- 973 Ortega-Farias, S. O., Cuenca, R. H., & Ek, M. (1996). Daytime variation of sensible heat flux
- estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. *Agricultural and Forest*
- 975 *Meteorology*, 81(1–2), 131–143. https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02278-3
- 976 Perez, P. J., Castellvi, F., Ibañez, M., & Rosell, J. I. (1999). Assessment of reliability of
- Bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 97(3),
- 978 141–150. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00080-5
- 979 Ping, Y., Qiang, Z., Yang, Y., Zhang, L., Zhang, H., Hao, X., & Sun, X. (2018). Seasonal and
- 980 inter-annual variability of the Bowen smith ratio over a semi-arid grassland in the
- Chinese Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 252, 99–108.
- 982 https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2018.01.006
- Pires, G. F., & Costa, M. H. (2013). Deforestation causes different subregional effects on the
- Amazon bioclimatic equilibrium. *Geophysical Research Letters*, 40(14), 3618–3623.
- 985 https://doi.org/10.1002/GRL.50570

- 986 Queiroz, M. G. de, Silva, T. G. F., Zolnier, S., Jardim, A. M. da R. F., de Souza, C. A. A.,
- 987 Araújo Júnior, G. do N., de Morais, 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-
- 989 arid region of Brazil. *CATENA*, *188*, 104457.
- 990 https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2020.104457
- 991 Queiroz, M. G., da Silva, T. G. F., Zolnier, S., de Souza, C. A. A., de Souza, L. S. B., Neto,
- 992 S., de Araújo, G. G. L., & Ferreira, W. P. M. (2019). Seasonal patterns of deposition
- 993 litterfall in a seasonal dry tropical forest. Agricultural and Forest Meteorology, 279,
- 994 107712. https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2019.107712
- Position Pos
- biofísicas em regiões semiáridas pelo emprego do sensoriamento remoto. SciELO Brasil.
- 997 Retrieved June 1, 2023, from
- 998 https://www.scielo.br/j/eagri/a/LgrnGfHCpVjYZ7NBWvKqyJB/citation/?lang=pt
- Rocha, H. R., Goulden, M. L., Miller, S. D., Menton, M. C., Pinto, L. D. V. O., De Freitas, H.
- 1000 C., & E Silva Figueira, A. M. (2004). Seasonality of water and heat fluxes over a tropical
- forest in eastern Amazonia. *Ecological Applications*, 14(4 SUPPL.), 22–32.
- 1002 https://doi.org/10.1890/02-6001
- Rubert, G. C. D., Souza, V. de A., Zimmer, T., Veeck, G. P., Mergen, A., Bremm, T., Ruhoff,
- A., de Gonçalves, L. G. G., & Roberti, D. R. (2022). Patterns and controls of the latent
- and sensible heat fluxes in the Brazilian Pampa Biome. *Atmosphere*, 13(1).
- 1006 https://doi.org/10.3390/atmos13010023
- Salvatierra, A. L. H., Ladle, R. J., Barbosa, H., Correia, R. A., & Malhado, A. C. M. (2017).
- Protected areas buffer the Brazilian semi-arid biome from climate change. *Biotropica*,
- 1009 49(5), 753–760. https://doi.org/10.1111/BTP.12459
- Santana, M. da S., Andrade, E. M., Oliveira, V. R., Costa, B. B., Silva, V. C., Freitas, M. do
- 1011 S. C. de, Cunha, T. J. F., & Giongo, V. (2021). Trophic groups of soil fauna in semiarid:
- Impacts of land use change, climatic seasonality and environmental variables.
- 1013 *Pedobiologia*, 89, 150774. https://doi.org/10.1016/J.PEDOBI.2021.150774
- Santos, M., Barros, V., Lima, L., Frosi, G., & Santos, M. G. (2021). Whole plant water status
- and non-structural carbohydrates under progressive drought in a Caatinga deciduous
- woody species. Trees 2021 35:4, 35(4), 1257–1266. https://doi.org/10.1007/S00468-021-
- 1017 02113-Y

- 1018 Santos, C. A. C., Mariano, 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.
- 1023 https://doi.org/10.1016/J.JAG.2019.101982
- Sheil, D., & Murdiyarso, D. (2009). How forests attract rain: An examination of a new
- 1025 hypothesis. *BioScience*, 59(4), 341–347.
- 1026 https://doi.org/10.1525/BIO.2009.59.4.12/2/BIO.2009.59.4.12-F02.JPEG
- 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.
- 1030 Water 2021, Vol. 13, Page 2962, 13(21), 2962. https://doi.org/10.3390/W13212962
- Silva, P. F. da, Lima, J. R. de S., Antonino, A. C. D., Souza, R., de Souza, E. S., Silva, J. R. I.,
- 2032 & Alves, E. M. (2017a). Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes
- over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. *Journal of Arid*
- 1034 Environments, 147, 71–82. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.003
- 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. (2017b). Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes
- over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. *Journal of Arid*
- 1038 Environments, 147, 71–82. https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2017.09.003
- Soper, F. M., McCalley, C. K., Sparks, K., & Sparks, J. P. (2017). Soil carbon dioxide
- emissions from the Mojave desert: Isotopic evidence for a carbonate source. *Geophysical*
- 1041 Research Letters, 44(1), 245–251. https://doi.org/10.1002/2016GL071198
- Souza, C. A. A. de, Jardim, A. M. da R. F., de Souza, L. S. B., Júnior, G. do N. A., Alves, C.
- 1043 P., de Morais, 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.
- 1046 Agricultural and Forest Meteorology, 341, 109679.
- 1047 https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2023.109679
- 1048 Souza, L. S. B., de Moura, M. S. B., Sediyama, G. C., & da Silva, T. G. F. (2015). Balanço de
- energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca
- intensa. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 50(8), 627–636.

- 1051 https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000800001
- Sun, G., Noormets, A., Gavazzi, M. J., McNulty, S. G., Chen, J., Domec, J. C., King, J. S.,
- Amatya, D. M., & Skaggs, R. W. (2010). Energy and water balance of two contrasting
- loblolly pine plantations on the lower coastal plain of North Carolina, USA. Forest
- 1055 *Ecology and Management*, 259(7), 1299–1310.
- 1056 https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2009.09.016
- Sun, X., Zou, C. B., Wilcox, B., & Stebler, E. (2019). Effect of Vegetation on the Energy
- Balance and Evapotranspiration in Tallgrass Prairie: A Paired Study Using the Eddy-
- 1059 Covariance Method. *Boundary-Layer Meteorology*, 170(1), 127–160.
- 1060 https://doi.org/10.1007/S10546-018-0388-9/FIGURES/3
- Tang, Y., Wen, X., Sun, X., & Wang, H. (2014). Interannual Variation of the Bowen Ratio in
- a Subtropical Coniferous Plantation in Southeast China, 2003-2012. *PLOS ONE*, 9(2),
- e88267. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0088267
- Teixeira, A. H. d. C., Bastiaanssen, W. G. M., Ahmad, M. D., Moura, M. S. B., & Bos, M. G.
- 1065 (2008). Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and
- natural ecosystems of semi-arid Brazil. *Journal of Hydrology*, 362(1–2), 110–127.
- 1067 https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2008.08.011
- Tian, L., Chen, J., & Zhang, Y. (2017). Growing season carries stronger contributions to
- albedo dynamics on the Tibetan plateau. *PLOS ONE*, 12(9), e0180559.
- 1070 https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0180559
- 1071 Tomasella, J., Silva Pinto Vieira, R. M., Barbosa, A. A., Rodriguez, D. A., de Oliveira
- Santana, M., & Sestini, M. F. (2018). Desertification trends in the Northeast of Brazil
- over the period 2000–2016. International Journal of Applied Earth Observation and
- 1074 Geoinformation, 73, 197–206. https://doi.org/10.1016/J.JAG.2018.06.012
- 1075 Unland, H. E., Houser, P. R., Shuttleworth, W. J., & Yang, Z. L. (1996). Surface flux
- measurement and modeling at a semi-arid Sonoran Desert site. Agricultural and Forest
- 1077 *Meteorology*, 82(1–4), 119–153. https://doi.org/10.1016/0168-1923(96)02330-1
- Wolf, S., Eugster, W., Majorek, S., & Buchmann, N. (2011). Afforestation of Tropical
- Pasture Only Marginally Affects Ecosystem-Scale Evapotranspiration. *Ecosystems*,
- 1080 14(8), 1264–1275. https://doi.org/10.1007/S10021-011-9478-Y/FIGURES/5
- 1081 Yue, P., Zhang, Q., Zhang, L., Li, H., Yang, Y., Zeng, J., & Wang, S. (2019). Long-term
- variations in energy partitioning and evapotranspiration in a semiarid grassland in the
- Loess Plateau of China. Agricultural and Forest Meteorology, 278, 107671.

1084	https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2019.107671
1085	
1086	
1087	
1088	
1089	
1090	
1091	
1092	
1093	
1094	
1095	
1096	
1097	
1098	
1099	
1100	
1101	

1 CAPÍTULO 2 – DINÂMICA DE CARBONO E NUTRIENTES EM PAISAGENS

COM DIFERENTES NÍVEIS DE INTERVENÇÃO ANTRÓPICA NO

SEMIÁRIDO BRASILEIRO

4 5

2

3

RESUMO

6 No Semiárido brasileiro é possível observar um mosaico de paisagens, em função das 7 atividades antrópicas (i.e., desmatamento). Assim, tais mudanças podem promover 8 reduções nos estoques de carbono (C) e nutrientes, principalmente em regiões áridas e 9 semiáridas. Nesta perspectiva, avaliou-se a dinâmica dos estoques de C e nutrientes em diferentes paisagens do semiárido brasileiro sob diferentes níveis de intervenção 10 11 antrópica. Para tanto, as paisagens de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em 12 regeneração (REGE), Caatinga desmatada (DEFA), clones de palma forrageira Orelha de 13 Elefante Mexicana – Sertão (OEM-S), Orelha de Elefante Mexicana – Agreste (OEM-A) 14 e IPA Sertânia – Agreste (IPA-A) foram avaliadas. As amostras de solo foram coletadas 15 em quatro profundidades (0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm) e foram quantificados as propriedades físico-químicas e os estoques de C, P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺. Os estoques de 16 17 carbono orgânico do solo (C) e P foram maiores na camada superficial do solo (0-10 cm) 18 para REGE e IPA-A. Enquanto os estoques de K⁺ foram maiores nas profundidades de 19 10-20 cm para CAA, REGE, OEM-S, IPA-A e DEFA. Por outro lado, os estoques de Ca²⁺ e Mg²⁺ aumentaram nas profundidades de 30-40 cm para OEM-S e DEFA, enquanto para 20 IPA-A o Ca²⁺ apresentou reduções nas profundidades de 10-40 cm. Os estoques de Mg²⁺ 21 22 aumentaram em CAA e DEFA. Além disso, os maiores estoques de C e P foram observados para OEM-A com médias de 58,9 e 0,4 Mg ha⁻¹, respectivamente. Os maiores 23 estoques de K⁺ foram observados em REGE (0,9 Mg ha⁻¹), enquanto os estoques de Ca²⁺ 24 25 foram similares entre as paisagens de CAA, REGE e OEM-A com médias de 6,5, 6,4 e 26 5,3 Mg ha⁻¹, respectivamente. Portanto, neste estudo observamos que os estoques de C e 27 nutrientes diminuem com o aumento da profundidade do solo, e são maiores durante a 28 estação chuvosa. Além disso, a paisagem com palma forrageira clone de Orelha de 29 Elefante Mexicana no Agreste apresentou maior capacidade em armazenar carbono e 30 fósforo.

31

32 **Palavras-chave:** Mudança no uso da terra, florestas seca, palma forrageira, estoques.

33

ABSTRACT

35

36 In the Brazilian semi-arid region, it is possible to observe a mosaic of landscapes, due to 37 human activities (i.e., deforestation). Thus, such changes can promote reductions in 38 carbon (C) and nutrient stocks, especially in arid and semi-arid regions. From this 39 perspective, the dynamics of C and nutrient stocks were evaluated in different landscapes 40 of the Brazilian semi-arid region under different levels of anthropogenic intervention. To 41 this end, the landscapes of preserved Caatinga (CAA), regenerating Caatinga (REGE), deforested Caatinga (DEFA), clones forage cactus 'Orelha de Elefante Mexicana' -42 43 Sertão (OEM-S), 'Orelha de Elefante Mexicana' – Agreste (OEM-A) and 'IPA Sertânia' - Agreste (IPA-A) were evaluated. Soil samples were collected at four depths (0-10, 10-44 20, 20-30 and 30-40 cm) and physicochemical properties and stocks of C, P, K⁺, Ca²⁺, 45 Mg²⁺ and Na⁺ were quantified. The soil organic carbon (C) and P stocks were higher in 46 47 the topsoil layer (0-10 cm) for REGE and IPA-A. While K⁺ stocks were greater at depths of 10-20 cm for CAA, REGE, OEM-S, IPA-A and DEFA. On the other hand, Ca²⁺ and 48 Mg²⁺ stocks increased at depths of 30-40 cm for OEM-S and DEFA, while for IPA-A 49 Ca²⁺ showed reductions at depths of 10-40 cm. Mg²⁺ stocks increased in CAA and DEFA. 50 51 Furthermore, the highest C and P stocks were observed for OEM-A with averages of 58.9 and 0.4 Mg ha⁻¹, respectively. The highest K⁺ stocks were observed in REGE (0.9 Mg ha⁻¹) 52 1), while Ca²⁺ stocks were similar between the CAA, REGE and OEM-A landscapes with 53 averages of 6.5, 6.4 and 5. 3 Mg ha⁻¹, respectively. Therefore, in this study we observed 54 55 that C and nutrient stocks decrease with increasing soil depth and are greater during the 56 rainy season. Furthermore, the landscape with forage cactus clone of 'Orelha de Elefante 57 Mexicana' in Agreste showed greater capacity to store carbon and phosphorus.

58 59

Keywords: Land use change, dry forests, forage cactus, stocks.

61

60

62

63 64

65

66

67

1. INTRODUÇÃO

A mudança do uso e cobertura da terra é considerada o principal fator que afeta o armazenamento de carbono (C), e a dinâmica na concentração e estoques de nutrientes no solo em ecossistemas terrestres (Lai et al., 2016). Além disso, fatores antrópicos podem causar danos e reduções na biodiversidade vegetal (Lai et al., 2016), serviços ecossistêmicos (Wang et al., 2022), conteúdo de matéria orgânica e aceleração dos processos de erosão do solo (Kong et al., 2006). Quando há remoção da vegetação nativa para o estabelecimento de cultivos agrícolas, consequentemente, haverá alterações na produção de biomassa aérea e radicular, entrada de matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e no intemperismo natural (Santana et al., 2022). Isso pode promover reduções nos estoques de C e nutrientes, principalmente em regiões áridas e semiáridas (Santos et al., 2021; Menezes et al., 2021).

Em florestas nativas, as concentrações de C e nutrientes são mais estáveis, em função da produtividade primária líquida e a ciclagem de nutrientes (Johnson & Turner, 2019). Isso porque a cobertura vegetal promove alterações na ciclagem biogeoquímica do ecossistema em função dos resíduos orgânicos, os quais afetam as características físicoquímicas e as características microclimáticas do solo. Contudo, os estoques de C e nutrientes diferem entre pastagens e florestas com diferentes tipos de cobertura vegetal (Zhu et al., 2014; Zhou et al., 2023).

No Semiárido brasileiro é possível observar um mosaico de paisagens, em função das forçantes antrópicas, que contribuíram para a modificação da vegetação nativa da Caatinga, a partir de fatores como o clima, extrativismo, manejo agrícola inadequado e o sobrepastoreio (Silva et al., 2021). Embora a Caatinga seja uma das maiores florestas tropicais sazonalmente secas (Schulz et al., 2016), e está inserida em uma das regiões semiáridas mais populosas (Jardim et al., 2022), estima-se que 46% da sua cobertura vegetal original tenha sido desmatada até 2009 (IBAMA, 2019). Em contrapartida, apenas 8% da Caatinga corresponde a áreas protegidas (MMA, 2019). No Semiárido brasileiro é possível observar desde áreas com vegetação nativa preservada e/ou em diferentes estágios sucessionais, como também áreas desmatadas e com cultivos de palma forrageira (*Opuntia* sp. e *Nopalea* sp.), espécies de grande importância no contexto do semiárido brasileiro (Althoff et al., 2018; Queiroz et al., 2020). Essas áreas podem apresentar variações nos estoques de C e nutrientes do solo, devido as características do solo e da vegetação.

O desmatamento é a segunda maior fonte de emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para o aumento da erosão, degradação, redução da fertilidade e da qualidade do solo. O declínio dos parâmetros físicos, químicos e biológicos, além de contribuir para o processo de desertificação (Bakhshandeh et al., 2019; Wijitkosum, 2016), podem modificar as propriedades ecológicas do solo, como a dinâmica de carbono e as propriedades microbianas (Ferreira et al., 2016). Alguns estudos avaliaram os impactos da mudança no uso da terra nas propriedades do solo no bioma Caatinga (Silva et al., 2021; Fernandes et al., 2020, Santana et al. 2019; Menezes et al., 2021; Santos et al., 2021). Por exemplo, Santana et al. (2022) constataram que as concentrações e estoques de fósforo (P) foram menores na Caatinga, enquanto as maiores concentrações e estoques foram registrados nos cultivos agrícolas, com maiores concentrações de cálcio (Ca²⁺) nas camadas de 0-20 cm. Em contrapartida, Menezes et al. (2021) observaram que os estoques médios de C foram 29% maiores em áreas de Caatinga densa (89,9 Mg ha⁻¹) quando comparados às áreas de Caatinga aberta, campos de pastagens e cultivos. No entanto, estudos que avaliaram as concentrações e os estoques de C e nutrientes no semiárido brasileiro ao longo do perfil do solo e em função da sazonalidade dos eventos de chuva, com destaque para ecossistemas de palma forrageira, Caatinga preservada, em regeneração e áreas totalmente desmatadas sob diferentes condições climáticas, ainda são incipientes, tornando-se necessário investigá-los.

Assim, caracterizar os diferentes tipos de paisagens e coberturas e a influência dos distúrbios antrópicos permitem compreender os impactos do uso da terra no clima e os seus efeitos nas paisagens nativas e cultivadas, adotar práticas sustentáveis para os ecossistemas terrestres (H. Li et al., 2020; Menezes et al., 2021), além de indicar estratégias de mitigação para o avanço das mudanças climáticas em ambientes semiáridos, a partir do uso sustentável da vegetação. Fica evidente, portanto, a necessidade de quantificar o impacto da mudança do uso e cobertura da terra na variabilidade e na dinâmica dos estoques de C e nutrientes nas diferentes paisagens que ocorrem no semiárido brasileiro. Nossa hipótese é que áreas agrícolas com cactos estocam mais carbono no solo do que florestas com diferentes níveis de perturbação antrópica ou em regeneração, os quais posteriormente podem ser indicados para recuperação de áreas degradadas e mitigação das mudanças climáticas atendendo aos objetivos propostos pela ONU com base no desenvolvimento sustentável no Brasil (ODS) como forma de proteção aos ecossistemas terrestres e mitigação das mudanças climáticas de acordo com as OSD 13 e 15. Dado o exposto, neste estudo objetivamos avaliar a dinâmica dos estoques de C

e nutrientes em ecossistemas de palma forrageira, Caatinga preservada, Caatinga em regeneração e uma área totalmente desmatada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1.Localização e caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido em duas propriedades privadas, localizadas nos municípios de Floresta (08°35'55" S, 38°33'50" W, 378 m) e Pesqueira (08°21'35" S, 38°41'42" W, 750 m), ambas situadas no estado de Pernambuco (Figura 1). Em Floresta, o clima é do tipo BSh (semiárido quente-seco, com período chuvoso no verão) de acordo com a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013). As características climáticas da região apresentam temperatura média do ar de ~26 °C, umidade relativa média do ar de 62%; chuvas concentradas no verão com volumes médios anuais de 489,3 mm; alta incidência de radiação solar e evapotranspiração potencial anual superior a 1800 mm (Queiroz et al., 2020). Em Pesqueira, o clima é semiárido quente (BShw) (Beck et al., 2018), com chuvas concentradas de janeiro a julho, registrando valores médios de 607 mm e temperatura do ar de 26 °C. Além disso, o solo que ocorre em Floresta e Pesqueira é caracterizado como Luvissolo Crômico (Santos et al., 2018). As características físicas do solo são exibidas na Tabela 1.

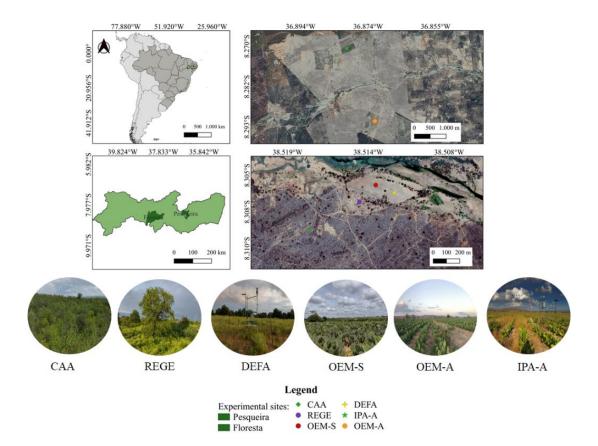


Figura 1. Localização das áreas experimentais com diferentes paisagens com mudança no uso da terra: Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE), Caatinga desmatada (DEFA) e clone de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana – Sertão (O EM-S) localizadas no município de Floresta, Pernambuco e clones de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana – Agreste e IPA-Sertânia – Agreste (IPA-A) localizadas no município de Pesqueira, Pernambuco.

Tabela 1. Características físicas do solo em áreas de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE), clone de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana no Sertão (OEM-S) e área desmatada (DEFA) localizadas em Floresta, Pernambuco, Brasil e clones de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana no Agreste (OEM-A) e IPA Sertânia no Agreste (IPA-A) localizadas em Pesqueira, Pernambuco, Brasil.

Características	CAA	REGE	OEM-S	OEM-A	IPA-A	DEFA
Ds (kg dm ⁻³)	1.39	1.39	1.34	1.64	1.66	1.28
$Dp (g kg^{-1})$	2.59	2.47	2.57	2.53	2.54	2.52
Pt (%)	46.39	43.95	48.05	35.51	34.57	49.30
$AT (g kg^{-1})$	555.98	353.17	559.97	738.20	714.88	561.60
$Sil (g kg^{-1})$	355.34	384.80	412.03	235.64	216.86	347.91

Arg (g kg⁻¹) 88.69 262.05 28.01 26.16 68.26 90.50

Ds – densidade do solo, Dp – densidade da partícula, Pt – porosidade total, AT – areia total, Sil – silte, Arg – argila.

Historicamente, a área de Caatinga preservada (CAA) era utilizada para atividades extrativistas, através da extração da madeira para uso doméstico (Figura 1). Além disso, a área ocupa aproximadamente 200 hectares, com espécies de diferentes hábitos como herbáceo, arbustivos e arbóreos, predominando as espécies de pequeno porte sendo estas endêmicas e decíduas. Assim, espécies como Cenostigma pyramidale (Tul.) G. & P. Lewis, Myracrodruon urundeuva Allemão, Aspidosperma pyrifolium Mart., Schinopsis brasiliensis Engl., Cnidoscolus quercifolius Pohl, Spondias tuberosa Arruda, Commiphora leptophloeos (Mart.) J.B. Gillett e Jatropha molíssima (Pohl) Baill., podem ser encontradas na respectiva área. A área de Caatinga em regeneração (REGE), por sua vez, compreende cerca de cinco hectares, onde sua vegetação nativa foi parcialmente desmatada para implementação de cultivos agrícolas. Nesta área permanece algumas espécies a exemplo de Schinopsis brasiliensis Engl., Myracrodruon urundeuva Allemão, Spondias tuberosa Arruda, Cnidoscolus quercifolius Pohl, Sideroxylon obtusifolium (Humb. ex Roem. & Schult.) T.D. Penn. O desmatamento parcial ocasionou-se para o plantio de Cenchrus ciliaris L. para criação de ovinos, contudo, com a não implementação, a área vem se regenerando naturalmente.

Por outro lado, a área de Caatinga desmatada (DEFA) que antes era composta por vegetação nativa teve sua área de três hectares completamente desmatada com o objetivo de cultivar algumas culturas de interesse agrícola, como algodão (*Gossypium hirsutum* L.), cebola (*Allium cepa* L.), feijão de corda (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), milho (*Zea mays* L.) e, capim corrente (*Urochloa mosambicensis* (Hack.) Dandy). No entanto, há 18 anos a área não é cultivada datando de 2005. Atualmente, a área encontra-se em processo de regeneração natural e é composta por gramíneas rasteiras espontâneas, arbustos que medem até 1,0 m e grandes faixas de solo nu, principalmente durante a estação seca.

Nas áreas de cultivos agrícolas, o sítio com Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.) localizada no Sertão (OEM-S), as plantas foram cultivadas em condições de sequeiro, sendo este cacto resistente a cochonilha do carmim (Jardim et al., 2021). Antes do plantio, práticas de mecanização do solo (e.g., aração, gradagem e sulcagem) foram aplicados. O plantio foi realizado em agosto de 2014, com espaçamento de 2 m entre fileiras e 0,5 m entre plantas (10.000 plantas ha⁻¹), o equivalente a um hectare de área plantada. Os cladódios foram inseridos deixando 50% da extremidade inserida no

solo. Enquanto os dois sítios de palma forrageira do Agreste, compostas por *Opuntia stricta* (Haw.) Haw. (OEM-A) e *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck (IPA-A) estão localizados em Pesqueira, Pernambuco. Além disso, ressaltamos que apenas na OEM-A foi realizada adubação orgânica com esterco (30 kg ha⁻¹) durante o período experimental.

2.2.Amostragem do solo e análises físico-químicas

Em cada uma das seis áreas experimentais foram coletadas amostras deformadas e indeformadas do solo. As amostras foram coletadas de forma aleatória em quatro camadas (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm e 30-40 cm) de seis áreas com aspectos homogêneos (Silva et al., 2021). As amostras deformadas após coletadas foram misturadas para obtenção de amostras compostas conforme a camada e a data. As propriedades físico-hídricas do solo foram obtidas conforme a metodologia descrita por Silva (2009), onde foram analisadas as seguintes propriedades: densidade do solo (Ds, kg dm⁻³), porosidade total (Pt, %) e frações totais de areia (g kg⁻¹), silte (g kg⁻¹) e argila (g kg⁻¹).

As propriedades químicas do solo por sua vez, foram obtidas conforme Silva (2009) e Medeiros et al. (2017). Com as amostras de solo foram quantificados os teores de carbono orgânico total (COT, g kg⁻¹), fósforo (P, mg dm⁻³), potássio (K⁺, cmol_c kg⁻¹), magnésio (Mg²⁺, cmol_c kg⁻¹), Ca²⁺ (cmol_c kg⁻¹) e sódio (Na⁺, cmol_c kg⁻¹), e soma de bases (SB, cmol_c kg⁻¹). O teor de carbono orgânico total do solo foi determinado pelo método Walkley-Black modificado. Este método envolve o uso de dicromato de sódio (Na₂Cr₂O₇) e ácido sulfúrico (H₂SO₄), e a oxidação da matéria orgânica é realizada a frio (Van Raij et al., 2001). Por sua vez, o P, K⁺ e Na⁺ disponíveis foram determinados pelo método de extração Mehlich-1 com 0,05 mol L⁻¹ de H₂SO₄ mais 0,025 mol L⁻¹ de HCl. A extração do teor de Ca²⁺ e Mg²⁺ foi obtida pelo método Mehlich-1 com KCl 1,0 mol L⁻¹.

2.3. Análise dos dados e estatística

Os estoques de C e nutrientes foram calculados em uma camada específica do solo conforme as Equações (1-6) (Li et al., 2017):

Estoque de
$$COT_i = COT_i \times Ds_i \times E_i \times 10^{-1}$$
 (1)

Estoque de
$$P_i = P_i \times Ds_i \times E_i \times 10^{-1}$$
 (2)

Estoque de
$$K_i = K_i \times Ds_i \times E_i \times 10^{-1}$$
 (3)

Estoque de
$$Mg_i = Mg_i \times Ds_i \times E_i \times 10^{-1}$$
 (4)

230 Estoque de
$$Ca_i = Ca_i \times Ds_i \times E_i \times 10^{-1}$$
 (5)

231 Estoque de
$$Na_i = Na_i \times Ds_i \times E_i \times 10^{-1}$$
 (6)

Onde COT_i é o conteúdo de COT na i-ésima camada de solo (g kg⁻¹), P_i é o conteúdo de P na i-ésima camada de solo (g kg⁻¹), K_i é o conteúdo de K⁺ na i-ésima camada de solo (g kg⁻¹), Mg_i é o conteúdo de Mg²⁺ na i-ésima camada de solo (g kg⁻¹), Ca_i é o conteúdo de Ca²⁺ na i-ésima camada de solo (g kg⁻¹) e Na_i é o conteúdo de Na⁺ na i-ésima camada de solo (g kg⁻¹), Ds_i é a densidade aparente da i-ésima camada de solo (g cm⁻³), e E_i equivale a espessura da i-ésima camada de solo (cm).

Para análise dos dados, calcularam-se médias do acumulado em 40 cm para que os estoques fossem comparados entre as seis paisagens (CAA, REGE, DEFA, OEM-S, OEM-A e IPA-A). Os testes de Shapiro-Wilk, Anderson-Darling, Lilliefor e Jaque-Bera (p<0,05) foram utilizados para verificar a normalidade dos dados. Além disso, as concentrações e os estoques de C e nutrientes foram submetidos a estatística descritiva. Considerando que os dados não apresentaram normalidade, a comparação das concentrações e estoques de C e nutrientes nas profundidades, em diferentes épocas do ano e entre paisagens foi realizada através dos testes de Kruskal-Wallis (p<0,05) e Conover-Iman (p<0,05). Todas as análises estatísticas foram realizadas no software XLSTAT versão 2018 (Addison, Paris, France, www.xlstat.com).

3. RESULTADOS

As características químicas do solo variaram significativamente ao longo das paisagens em função das quatro profundidades avaliadas (p<0,05) (Tabela 2). De modo geral, as concentrações dos nutrientes e carbono diminuíram ao longo da profundidade, de modo que, o COT e P apresentaram reduções no perfil do solo. Observamos maiores valores nas camadas mais superficiais nas paisagens de REGE e IPA-A, com reduções de 55% e 59% na camada de 10-40 cm para o COT e P na REGE, respectivamente. Enquanto na IPA-A as reduções foram de 44% para o COT e 60% para o P (p<0,05). Houve reduções nas concentrações de K⁺ para CAA, REGE, OEM-S, IPA-A e DEFA, com valores significativamente maiores nas camadas de 10-20 cm, enquanto os menores valores foram registrados nas camadas de 30-40. Tais resultados mostraram reduções de 56% para CAA, 47% para REGE, 32% para OEM-S, 39% para IPA-A e 74% para DEFA (p<0,05). Em contrapartida, as concentrações de Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺ aumentaram conforme o aumento da profundidade (40 cm), com acréscimos de 65% e 63% nas paisagens OEM-S e DEFA para o Ca²⁺, respectivamente, enquanto na IPA-A o Ca²⁺ reduziu 28% da profundidade de 10-40 cm.

Tabela 2. Características química do solo (carbono orgânico total – COT, fósforo – P, potássio – K⁺,
 cálcio – Ca²⁺, magnésio – Mg²⁺, sódio – Na⁺ e soma de bases – SB) nas camadas de 0-40 cm em áreas
 de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE), Orelha de Elefante Mexicana –
 Sertão (OEM-S), e Caatinga desmatada (DEFA) em Floresta, Pernambuco, Brasil e Orelha de
 Elefante Mexicana – Agreste (OEM-A), IPA-Sertânia – Agreste (IPA-A) em Pesqueira, Pernambuco,
 Brasil.

			CAA			REGE			OEM-S			OEM-A			IPA-A			DEFA	
Camada	n	α	μ	1-α	α	μ	1-α	α		1-α	α	u u	1-α	α	μ	1-α	α	μ	1-α
Cumudu			μ	w		μ	1 0		•	COT (g			w	- J.	pr_	1 0		μ	
0-10	8	0.63	5.51a	10.39	3.92	8.80a	13.69	1.82	4.83a	7.84		10.62a	11.81	7.61	8.60a	9.58	1.56	3.82a	6.08
		1.34	4.28a	7.22		5.22ab	7.69		4.35a	8.48	7.11	8.99a			6.77b			5.42a	
20-30	8	1.51	3.77a	6.03		4.52ab	6.97		3.00a	4.35	5.67	8.56a			5.53bc			3.51a	5.97
30-40	8	1.72	3.93a	6.14	1.46	3.88b	6.29	1.55	2.96a	4.36	5.21	8.02a	10.83	3.75	4.77c	5.79	1.37	2.75a	4.12
Média		1.30	4.37	7.45	2.55	5.60	8.66	1.31	3.78	6.26		9.05	11.24	5.40	6.42	7.43	0.90	3.87	6.85
										P (mg									
		1.21	6.99a									61.57a							
10-20			5.99a									50.50a							
20-30			3.24a	5.62								101.05a							
30-40			3.85a	6.52								37.35a							
Média		1.37	5.01	8.66	11.42	22.68	33.95	5.49				62.62	112.19	6.26	9.37	12.48	-0.09	18.88	37.84
0.10	0	0.22	0.20-	0.27	0.20	0.61-	0.04	0.10		+ (cmol		0.20-	0.22	0.10	0.20-	0.20	0.21	0.50-	0.07
		0.22 0.12	0.30a 0.20ab	0.37 0.28	0.38 0.29	0.61a 0.45ab			0.25a 0.18ab	0.31 0.23	0.25 0.22	0.29a 0.25a			0.28a 0.24ab		0.21 0.19	0.59a 0.36a	0.97 0.52
		0.12	0.20ab	0.28	0.29	0.43ab			0.18ab	0.25	0.22	0.23a 0.39a			0.24ab			0.30a 0.20b	0.32
30-40			0.13b	0.18	0.27	0.33b	0.39		0.18ab	0.23	0.00	0.35a 0.25a			0.21ab			0.200 0.15c	0.23
Média			0.19	0.15	0.29	0.43	0.56		0.170	0.27		0.29			0.176			0.130	0.10
Media	_	0.13	0.17	0.20	0.27	0.43	0.50	0.13		2+ (cmc			0.40	0.10	0.23	0.27	0.17	0.32	0.47
0-10	8	4.09	5.77a	7.46	4.23	5.58a	6.94	1.91	2.46b	3.00	1.90	4.23a	6.55	0.97	1.15a	1.34	2.38	3.00b	3.62
10-20			5.11a	6.23	3.99	5.62a	7.25		2.99b	3.15	3.27	4.14a			1.04ab			3.47b	4.20
20-30			6.39a	7.75	4.38	6.53a	8.69		3.93a	4.39	2.65	3.86a			0.96ab			4.52a	5.20
30-40			6.58a	7.78	4.30	5.40a	6.51	3.73	4.06a	4.39	2.63	3.87a	5.12	0.65	0.82b	0.98	3.99	4.91a	5.83
Média		4.62	5.96	7.30	4.22	5.78	7.34	2.98	3.36	3.73	2.61	4.02	5.44	0.79	0.99	1.19	3.24	3.97	4.71
									Mg	²⁺ (cmo	ol _c dm ⁻³	3)							
		1.46	1.87b	2.28	1.18	2.42a		0.77	0.90c	1.03	0.51	1.01a			0.47a				1.52
			2.35ab	3.84	1.58	2.84a	4.11	1.07	1.20b	1.34	0.69	0.90a						1.50abc	
20-30			3.43a	4.74	2.18	3.27a		1.56	1.67a	1.77	0.44	1.08a						1.94ab	
30-40			3.25a	4.42	2.00	2.70a		1.49	1.69a	1.89	0.28	1.52a			0.42a			2.02a	2.47
Média		1.63	2.73	3.82	1.74	2.81	3.88	1.22	1.37	1.51	0.48	1.13	1.77	0.32	0.41	0.50	1.34	1.68	2.03
0.40	_	0.05	0.10	0.22	0.04	0.401	0.00	0.10		t ⁺ (cmo			0.20	0.00	0.05	0.10	0.01	0.02	0.07
		0.06	0.19a	0.33	-0.04			0.19	0.30b	0.40	0.10	0.19a			0.07a		0.01	0.03c	
		-0.02	0.26a	0.55		0.22ab		0.39	0.53a	0.68	0.12	0.19a			0.07a			0.05abc	
		0.00	0.48a	0.96	0.12	0.33a	0.55 0.73	0.35	0.52a	0.69	0.12	0.22a			0.07a			0.08ab	
30-40 Média	ð	0.04	0.57a 0.38	1.10 0.74	0.08	0.41a 0.26	0.73		0.50a 0.46	0.63 0.60	0.16 0.13	0.27a 0.22			0.08a 0.07			0.11a	0.16
Media		0.02	0.36	0.74	0.03	0.20	0.49	0.32	0.40	SE		0.22	0.31	0.03	0.07	0.09	0.03	0.07	0.11
0-10	8	6 57	8.13b	9.69	6.21	8.71a	11 20	3 17	3.90c	4.63		5.72a	8 51	1.83	1.97a	2 10	4 24	4.90b	5.56
			7.93ab			9.13a			4.91b	5.05		5.48a			1.72ab			5.37b	6.26
			10.43ab						6.30a	6.84		5.55a			1.60b			6.74a	7.80
			10.54a			8.83a			6.43a	6.90		5.91a			1.49b			7.18a	8.58
Média		7.12	9.26	11.39			12.03		5.38	5.85		5.67				1.96		6.05	7.05
			-			-		•		Ca ²⁺ /									
0-10	8	13.40	19.94b	26.49	2.87	11.16b	19.45	7.47	10.18b			14.59a	20.88	2.77	4.72a	6.67	3.22	6.80d	10.38
			28.87b															11.45c	16.62
			51.11a																
30-40	8	23.03	59.27a	95.50	12.43	18.70a	24.98	15.80	29.41a	43.02	10.97	15.97a	20.97	3.46	4.84a	6.22	24.13	33.87a	43.60

Média		21.14	39.80	58.46	8.65	16.08	23.51	12.60	20.34	28.07	10.48	14.99	19.51	3.33	4.74	6.14	13.02	18.94	24.85
										Ca ²⁺ /N	$1g^{2+}$								<u> </u>
0-10	8	1.73	3.29a	4.85	1.91	2.51a	3.12	2.35	2.72a	3.09	2.99	4.18a	5.36	1.88	2.59a	3.29	2.01	2.36a	2.72
10-20	8	1.02	2.86a	4.70	1.71	2.08a	2.45	2.23	2.50a	2.77	4.04	4.72a	5.39	2.32	2.78a	3.24	1.95	2.32a	2.69
20-30	8	1.27	2.06a	2.85	1.73	2.02a	2.31	2.08	2.36a	2.65	2.70	4.20a	5.69	2.06	2.64a	3.22	2.20	2.34a	2.48
30-40	8	1.24	2.30a	3.35	1.77	2.03a	2.28	2.16	2.41a	2.67	1.99	3.59a	5.20	1.67	1.96b	2.25	2.24	2.46a	2.69
Média		1.31	2.63	3.94	1.78	2.16	2.54	2.21	2.50	2.79	2.93	4.17	5.41	1.98	2.49	3.00	2.10	2.37	2.65
										Mg^{2+}	K^+								
0-10	8	4.36	6.68b	9.00	-0.25	5.24b	10.73	2.75	3.77c	4.79	2.10	3.46a	4.81	1.25	1.82ab	2.40	1.39	2.84d	4.28
10-20	8	-0.64	15.25ab	31.15	1.27	7.57ab	13.87	5.14	7.01b	8.87	2.89	3.55a	4.22	1.33	1.62b	1.91	2.88	4.84c	6.80
20-30	8	11.87	29.53a	47.20	7.35	10.00a	12.65	6.91	10.11ab	13.32	2.38	3.18a	3.97	1.42	1.88ab	2.34	7.61	10.21b	12.81
30-40	8	7.06	32.69a	58.32	5.45	9.50ab	13.55	6.77	12.16a	17.56	0.24	6.86a	13.47	1.76	2.52a	3.29	9.31	14.01a	18.71
Média		5.66	21.04	36.42	3.46	8.08	12.70	5.39	8.26	11.13	1.90	4.26	6.62	1.44	1.96	2.49	5.30	7.97	10.65
									(C	$a^{2+}+M_{2}$	$g^{2+})/K^{+}$								
0-10	8	19.13	26.62b	34.11	2.64	16.40b	30.15	10.33	13.96b	17.58	10.53	18.05a	25.56	4.15	6.54a	8.94	4.66	9.64d	14.61
10-20	8	13.13	44.13b	75.12	5.92	22.12ab	38.32	17.05	24.64a	32.23	17.56	19.81a	22.06	4.82	6.12a	7.41	9.25	16.29c	23.33
20-30	8	47.67	80.64a	113.61	22.22	29.92a	37.61	22.35	34.22a	46.10	10.91	16.33a	21.75	5.18	6.77a	8.36	26.07	33.83b	41.60
30-40	8	31.43	91.95a	152.47	17.95	28.21ab	38.47	22.72	41.58a	60.43	12.65	22.83a	33.00	5.29	7.36a	9.44	33.47	47.88a	62.30
Média		27.84	60.83	93.83	12.18	24.16	36.14	18.11	28.60	39.09	12.91	19.25	25.59	4.86	6.70	8.54	18.36	26.91	35.46

Médias (μ) na horizontal seguidas pela mesma letra para as diferentes paisagens não se diferem entre si ao nível de significância de (α < 0,05) pelo teste não paramétrico de Conover-Iman (comparação entre k amostras). α , 1- α – indicam o intervalo de confiança.

272

As concentrações de Mg²⁺ foram significativamente maiores para CAA, OEM-S e 273 DEFA na profundidade de 30-40 cm, com os menores valores registrados na camada mais 274 275 superficial (0-10 cm), assim os aumentos foram de 74% para CAA, 88% para OEM-S e 276 57% para DEFA (p<0.05). O Na⁺ por sua vez, apresentou maiores médias na CAA e 277 DEFA, com aumentos de 310% e 266%, respectivamente (p<0,05). A SB para CAA, 278 OEM-S, e DEFA foi maior nas profundidades de 30-40 cm com aumentos de 29% na 279 CAA, 65% na OEM-S, e 46% na DEFA, enquanto na IPA-A os maiores valores foram 280 observados nas camadas superficiais (0-20 cm), os quais apresentaram reduções de 24% (p<0,05). A relação Ca^{2+}/K^+ , Mg^{2+}/K^+ e $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/K^+$ apresentaram diferenças 281 282 significativas para CAA, REGE, OEM-S e DEFA, com aumentos em função da 283 profundidade, registrando maiores médias nas profundidades de 30-40 cm. Por outro lado, para IPA-A apresentou diferença significativa apenas para a relação Ca²⁺/Mg²⁺ e 284 Mg²⁺/K⁺. Ambas as relações apresentaram comportamento contrastante, sendo Ca²⁺/Mg²⁺ 285 286 com maiores médias observadas nas camadas mais superficiais (0-20 cm), com redução 287 de 24% na camada de 30-40 cm. Por outro lado, o Mg²⁺/K⁺ ocorreu o inverso, com maiores médias na camada mais profunda (30-40 cm) com aumento de 38% quando 288 289 comparada as camadas mais superficiais (p<0,05). 290 Os estoques de C, P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺ para as seis paisagens são apresentados na 291 Tabela 3. Como esperado, os estoques, em sua grande maioria, diminuíram ao longo do 292 perfil do solo. Assim, os estoques de C e P foram significativamente maiores para REGE e IPA-A, com médias de 11,81 e 13,86 Mg ha⁻¹ para C e 0,05 e 0,02 Mg ha⁻¹ para P, 293

respectivamente, na camada de 0-10 cm (p<0,05). Isso mostra que houve reduções no estoque de C de 53% para REGE e 41% para IPA-A na camada de 30-40, enquanto o estoque de P as reduções foram de 60 e 50% para REGE e IPA-A, respectivamente. Além disso, os estoques de K⁺ diferiram significativamente ao longo do perfil do solo para CAA, REGE, OEM-S, IPA-A e DEFA, registrando maiores médias na camada de 0-10 cm com 0.17, 0.32, 0.13, 0.18 e 0.30 Mg K⁺ ha⁻¹, respectivamente. Ou seja, foram encontradas reduções nas camadas de 30-40 cm de 58% para CAA, 43% para REGE, 31% para OEM-S, 31% IPA-A e 76% para DEFA (p<0,05). A 0-10 cm percebe-se que os estoques de Ca²⁺ são menores quando comparados a profundidade de 30-40 cm para OEM-S e DEFA, com aumentos de 66% e 58%, respectivamente. Na IPA-A o comportamento do Ca²⁺ foi contrário, com maiores médias na camada mais superficial (0-10 cm) de 0,37 Mg Ca²⁺ ha⁻¹ com redução de 24% para a camada de 30-40 cm. Por sua vez, os estoques de Mg²⁺ diferiram para CAA, OEM-S e DEFA com aumentos ao longo do perfil do solo, com médias de 0.56, 0.26 e 0.30 Mg h⁻¹ a 30-40 cm. Tais aumentos tiveram magnitude de 69% para CAA, 86% para OEM-S e 55% para DEFA (p<0,05). Similarmente, os estoques de Na⁺ aumentaram ao longo do perfil do solo para REGE, OEM-S e DEFA, registrando maiores médias a 30-40 cm de profundidade, o equivalente a 333, 77 e 200%, respectivamente.

312

294

295

296

297

298

299

300

301

302

303

304

305

306

307

308

309

310

Tabela 3. Estoques de C, P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺ nas camadas de 0-40 cm em áreas de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE), Caatinga desmatada (DEFA), Orelha de Elefante Mexicana – Sertão (OEM-S) em Floresta, Pernambuco, Brasil e clone IPA-Sertânia – Agreste (IPA-A) e Orelha de Elefante mexicana – Agreste (OEM-A) em Pesqueira, Pernambuco, Brasil.

Camada			CAA			REGE			OEM-S	S	(OEM-A			IPA-A			DEFA	
cm	n	α	μ	1-α	α	μ	1-α	α	μ	1-α	α	μ	1-α	α	μ	1-α	α	μ	1-α
									C	stock (Mg ha	-1)							
0-10	8	3.42	9.55a	15.69	9.32	13.25a	17.17	4.73	7.47a	10.21	14.18	15.96a	17.74	12.27	13.86a	15.44	3.91	5.78a	7.66
10-20	8	3.22	6.45a	9.67	7.13	8.97ab	10.82	1.81	6.61ab	11.40	11.72	14.83a	17.94	9.42	11.26ab	13.09	0.93	7.77a	14.61
20-30	8	3.73	5.64a	7.54	4.33	8.54b	12.75	4.05	4.91b	5.77	9.52	14.37a	19.21	7.68	9.32bc	10.96	2.91	5.36a	7.82
30-40	8	4.61	6.43a	8.26	3.33	5.98b	8.63	4.12	4.70b	5.28	8.90	13.70a	18.51	6.34	8.07c	9.80	2.90	4.49a	6.08
Média		3.75	7.02	10.29	6.03	9.18	12.34	3.68	5.92	8.17	11.08	14.72	18.35	8.93	10.63	12.32	2.66	5.85	9.04
									P :	stock (Mg ha	⁻¹)							
0-10	8	0.00	0.01a	0.02	0.03	0.05a	0.07	0.01	0.03a	0.04	0.07	0.09a	0.11	0.01	0.02a	0.03	0.00	0.04a	0.07
10-20	8	0.00	0.01a	0.01	0.01	0.03ab	0.04	0.01	0.02a	0.03	0.06	0.08a	0.11	0.01	0.02a	0.02	0.00	0.03a	0.06
20-30	8	0.00	0.00a	0.01	0.01	0.02b	0.03	0.00	0.02a	0.03	-0.08	0.17a	0.42	0.01	0.01ab	0.02	0.00	0.02a	0.03
30-40	8	0.00	0.01a	0.01	0.00	0.02b	0.04	0.00	0.02a	0.04	0.03	0.06a	0.10	0.01	0.01b	0.01	0.00	0.01a	0.03
Média		0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.05	0.01	0.02	0.03	0.02	0.10	0.18	0.01	0.02	0.02	0.00	0.02	0.05
									K ⁺	stock	(Mg ha	ı ⁻¹)							
0-10	8	0.13	0.17a	0.21	0.20	0.32a	0.44	0.10	0.13a	0.16	0.15	0.17a	0.19	0.12	0.18a	0.24	0.11	0.30a	0.49

10-20	8	0.07	0.11ab	0.15	0.16	0.24ab	0.33	0.07	0.09ab	0.12	0.14	0.16a	0.18	0.11	0.16ab	0.20	0.10	0.18a	0.26
20-30	8	0.05	0.07b	0.09	0.14	0.18b	0.21	0.06	0.09ab	0.13	0.04	0.26a	0.48	0.10	0.14ab	0.18	0.08	0.10b	0.11
30-40	8	0.04	0.07b	0.11	0.11	0.18b	0.24	0.04	0.09b	0.14	0.14	0.16a	0.18	0.10	0.12b	0.14	0.06	0.07c	0.09
Média		0.07	0.10	0.14	0.15	0.23	0.30	0.07	0.10	0.14	0.12	0.19	0.26	0.10	0.15	0.19	0.09	0.16	0.24
									Ca ²⁻	stock	(Mg h	a ⁻¹)							
0-10	8	1.19	1.68a	2.17	1.14	1.50a	1.87	0.51	0.66b	0.80	0.57	1.27a	1.97	0.31	0.37a	0.43	0.62	0.78b	0.94
10-20	8	1.10	1.41a	1.72	1.11	1.57a	2.02	0.75	0.79b	0.84	1.08	1.37a	1.65	0.26	0.35ab	0.44	0.71	0.90b	1.08
20-30	8	1.31	1.67a	2.02	1.21	1.81a	2.41	0.92	1.05a	1.17	0.89	1.30a	1.70	0.26	0.32ab	0.39	0.97	1.15a	1.32
30-40	8	1.52	1.86a	2.20	1.23	1.55a	1.86	1.01	1.10a	1.19	0.90	1.33a	1.75	0.22	0.28b	0.33	1.00	1.24a	1.47
Média		1.28	1.65	2.03	1.17	1.61	2.04	0.80	0.90	1.00	0.86	1.32	1.77	0.26	0.33	0.40	0.83	1.02	1.20
									Mg^2	+ stock	(Mg ł	na ⁻¹)							
0-10	8	0.26	0.33b	0.40	0.19	0.39a	0.60	0.13	0.15b	0.17	0.09	0.18a	0.28	0.07	0.09a	0.11	0.16	0.20b	0.24
10-20	8	0.14	0.39ab	0.64	0.27	0.48a	0.70	0.17	0.19a	0.21	0.14	0.18a	0.22	0.06	0.08a	0.09	0.18	0.24ab	0.29
20-30	8	0.33	0.54ab	0.75	0.37	0.55a	0.73	0.25	0.27a	0.29	0.09	0.22a	0.35	0.06	0.08a	0.09	0.24	0.30a	0.36
30-40	8	0.36	0.56a	0.76	0.35	0.47a	0.59	0.25	0.28a	0.31	0.06	0.32a	0.57	0.07	0.09a	0.11	0.24	0.31a	0.38
Média		0.27	0.46	0.64	0.29	0.47	0.65	0.20	0.22	0.24	0.10	0.23	0.35	0.06	0.08	0.10	0.21	0.26	0.32
									Na ⁺	stock	(Mg h	a ⁻¹)							
0-10	8	0.02	0.06a	0.11	-0.01	0.03b	0.07	0.06	0.09b	0.12	0.03	0.07a	0.10	0.01	0.02a	0.04	0.00	0.01b	0.02
10-20	8	-0.01	0.08a	0.17	-0.01	0.07ab	0.15	0.12	0.16a	0.21	0.05	0.07a	0.10	0.02	0.03a	0.04	0.00	0.01b	0.02
20-30	8	0.00	0.14a	0.29	0.04	0.11a	0.18	0.11	0.16a	0.21	0.05	0.08a	0.12	0.02	0.03a	0.03	0.01	0.02ab	0.04
30-40	8	0.01	0.19a	0.36	0.03	0.13a	0.24	0.12	0.16a	0.20	0.06	0.11a	0.15	0.02	0.03a	0.04	0.02	0.03a	0.05
Média		0.01	0.12	0.23	0.01	0.08	0.16	0.10	0.14	0.19	0.05	0.08	0.12	0.02	0.03	0.04	0.01	0.02	0.03

Médias (μ) na horizontal seguidas pela mesma letra para as diferentes paisagens não se diferem entre si ao nível de significância de (α < 0,05) pelo teste não paramétrico de Conover-Iman (comparação entre k amostras). α , 1- α – indicam o intervalo de confiança.

318

319

320

321

322

323

324

325

326

327

328

329

330

331

332

333

334

335

336

337

Para os estoques de C e nutrientes em diferentes épocas do ano em áreas de CAA, REGE, DEFA, OEM-S, OEM-A e IPA-A observou-se diferenças significativas (p<0,05) (Tabela 4). Desta forma, notou-se variações para os estoques de C em função das épocas do ano para CAA e OEM-A, de modo que, na CAA os maiores estoques foram observados no tempo 2, com reduções de ~64% para o tempo 3 (p<0,05). Já na OEM-A, os maiores estoques foram observados no tempo 1 com reduções no tempo 3 para OEM-A, o equivalente a 46%. Por sua vez, os estoques de P foram semelhantes aos de C com diferenças significativas para CAA, REGE, OEM-S, OEM-A e DEFA (p<0,05). Na CAA, REGE e OEM-S, os estoques de P aumentaram em função do tempo, com aumentos de 0,019 Mg ha⁻¹ do tempo 2 para o tempo 7 na CAA, 0,03 Mg ha⁻¹ do tempo 2 para o tempo 6 na REGE e do tempo 3 para o tempo 6 na OEM-S, respectivamente (p<0,05). Por outro lado, na OEM-A e DEFA os estoques de P diminuíram em função do tempo, com reduções de 0,27 e 0,06 Mg ha⁻¹ do tempo 2 para o tempo 3 na OEM-A e DEFA, respectivamente. Em contrapartida, os estoques de K⁺ foram significativos apenas para as paisagens de palma forrageira, de modo que houve aumento ao longo do tempo. Assim, na OEM-S houve um acréscimo de 114% do tempo 1 para o tempo 2, enquanto na OEM-A esse acréscimo foi de 42% do tempo 3 para o 4 com redução de 30% para o tempo 7. Houve aumento de 120% do tempo 2 para o tempo 7 na IPA-A. Da mesma forma, os estoques de Mg²⁺ aumentaram ao longo do tempo para REGE e IPA-A. Esses aumentos 338 foram de 93% do tempo 1 para 8 em REGE e de 43% do tempo 2 para o tempo 8 na IPA-339 A (p<0,05). Já na CAA e OEM-A o comportamento foi contrário, com reduções de 62% 340 no estoque de P para CAA do tempo 3 para o tempo 5, e 69% do tempo 2 para o tempo 8 341 na OEM-A. Os estoques de Na⁺ diminuíram na CAA, OEM-A e IPA-A. Na CAA, essas 342 reduções foram de 96% do tempo 3 para o tempo 5, enquanto na OEM-A foi de 73% do 343 tempo 1 para o tempo 8 e na IPA de 75% do tempo 2 para o tempo 8 (p<0,05). REGE e DEFA apresentaram aumentos de 0,14 Mg ha⁻¹ e 0,027 Mg ha⁻¹ no estoque de Na⁺, 344 345 durante os tempos 1 e 2 para o tempo 8, respectivamente.

Tabela 4. Estoques de C, P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺ em diferentes épocas do ano em áreas de Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração (REGE), Orelha de Elefante Mexicana – Sertão (OEM-S) e Caatinga desmatada (DEFA) em Floresta, Pernambuco, Brasil e clones de Orelha de Elefante Mexicana – Agreste (OEM-A) e IPA-Sertânia – Agreste (IPA-A) em Pesqueira, Pernambuco, Brasil.

			CAA			REGE			OEM-S			OEM-A			IPA-A			DEFA	
Periodo	\overline{n}	α	μ	1-α	α	μ	1-α	α	μ	1-α	α	μ	1-α	α	μ	1-α	α	μ	1-α
									C	stock (Mg ha	a ⁻¹)							
1	4	4.27	5.62ab	6.97	2.34	7.10a	11.87	4.86	6.21a	7.57	13.55	21.08a	28.61	8.17	12.54a	16.91	3.68	4.29a	4.90
2	4	3.93	12.23a	20.53	2.15	11.16a	20.17	0.11	9.28a	18.45	7.62	16.64ab	25.65	4.60	9.06a	13.51	5.34	8.17a	11.00
3	4	3.64	4.39b	5.15	6.48	11.49a	16.51	3.90	4.74a	5.58	9.03	11.45b	13.86	5.89	11.87a	17.84	3.09	4.14a	5.18
4	4	3.83	5.31ab	6.79	5.12	9.65a	14.19	3.41	4.84a	6.26	9.59	15.92ab	22.24	5.13	9.16a	13.18	2.89	4.25a	5.62
5	4	4.02	6.22ab	8.42	3.76	7.81a	11.87	2.91	4.93a		5.11	10.80b				16.70		4.37a	6.05
6	4	1.85	7.41ab	12.97	2.08	7.73a	13.38	2.99	4.52a	6.04	8.91	12.72ab	16.52	8.03	10.59a	13.14	0.00	8.21a	21.57
7	4	1.66	6.82ab	11.98	1.85	8.76a	15.68	3.72	5.19a	6.65		12.72ab			11.20a	12.83	2.35	7.07a	14.36
8	4	1.48	6.24ab	11.00	1.62	9.80a	17.97	4.45	5.86a	7.27	14.69	16.40ab	18.10	6.63	7.75a	8.87	4.71	5.92a	7.14
Média		3.08	6.78	10.48	3.17	9.19	15.20	3.29	5.69	8.10	9.79	14.72	19.65	6.41	10.27	14.12	3.09	5.80	9.48
										stock (Mg ha								
1	4	0.00	0.01abc	0.02	0.00	0.03ab	0.07	0.00	0.01d	0.02	0.08	0.12a	0.16	0.01	0.02a	0.04	0.00	0.02ab	0.06
2	-	0.00	0.001d	0.00		0.01b			0.02cd			0.31abc	0.94	0.00	0.02a	0.03	0.03		
3			0.002bcd						0.01d			0.04cd	0.06	0.00	0.01a	0.02		0.01b	
4	4	0.001	0.002cd											0.01	0.02a			0.03ab	
5		0.00	0.01ab						0.02bcd			0.05c	0.10	0.00	0.01a	0.02		0.01b	
6		0.00	0.01ab			0.04a			0.04a	0.04	0.02	0.05bc	0.09	0.01	0.01a	0.02		0.02ab	
7		0.001	0.02a	0.03		0.03ab			0.03ab	0.04	0.05	0.06bcd	0.08	0.01	0.01a	0.02		0.02ab	
8	4		0.01abcd			0.02ab		0.02	0.03ab	0.05	0.08	0.09abc	0.11	0.006	0.01a	0.021		0.02ab	
Média		0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.05	0.01	0.02	0.03	0.00	0.10	0.21	0.01	0.02	0.02	0.00	0.02	0.04
										stock									
1		0.06	0.12a			0.24a			0.07b	0.09		0.19ab	0.23	0.14	0.19ab	0.25		0.22a	
2		0.01	0.08a	0.16		0.17a		0.11	0.15a		-0.22		0.93	0.10	0.10c	0.11	0.07	0.15a	
3		0.01	0.08a			0.31a			0.10ab			0.14c	0.16	0.10	0.12bc	0.13		0.17a	
4		0.011	0.08a			0.25a			0.11ab			0.20a	0.24		0.14abc			0.14a	
5		0.04	0.14a	0.23		0.27a			0.09ab				0.18		0.13abc			0.11a	
6		0.03	0.13a	0.23					0.12ab			0.15bc	0.17		0.12abc			0.15a	
7		0.047	0.15a						0.10ab			0.14c	0.15	0.11	0.22a			0.15a	
8		-0.01	0.08a						0.08ab				0.19	0.108		0.237	0.11	0.18a	
Média		0.03	0.11	0.19	0.11	0.23	0.34	0.06	0.10	0.14		0.19	0.28	0.10	0.15	0.20	0.06	0.16	0.33
	_	4.0-						0.00		+ stock									
1		1.03	1.65a	2.27	1.16				0.93a	1.47		1.61a	3.15	0.20	0.26a	0.32	0.51	1.04a	1.56
2	4	1.02	1.54a	2.05	0.92	1.34a	1.76	0.40	0.80a	1.20	1.09	1.72a	2.35	0.13	0.28a	0.43	0.85	0.89a	0.94

3	4 0.92	1.49a	2.06	1.12	1.81a	2.50	0.58	0.90a	1.22	0.84	1.01a	1.18	0.28	0.36a	0.45	0.27	1.02a	1.77
4	4 1.425	1.51a	1.60	1.19	1.60a	2.01	0.58	0.87a	1.17	0.21	1.74a	3.27	0.33	0.39a	0.46	0.70	1.02a	1.34
5	4 1.23	1.78a	2.33	0.53	1.70a	2.88	0.67	0.88a	1.10	0.80	1.00a	1.20	0.22	0.29a	0.35	0.71	0.99a	1.26
6	4 1.56	1.96a	2.36	1.37	1.53a	1.70	0.60	0.90a	1.21	0.92	1.09a	1.26	0.19	0.32a	0.45	0.87	1.17a	1.47
7	4 1.312	1.65a	1.99	1.221	1.52a	1.81	0.67	0.92a	1.18	1.00	1.29a	1.58	0.24	0.39a	0.55	0.77	1.10a	1.33
8	4 0.67	1.51a	2.35	1.33	1.90a	2.46	0.68	0.98a	1.28	1.00	1.07a	1.14	0.257	0.36a	0.456	0.68	0.98a	1.29
Média	1.14	1.64	2.13	1.10	1.59	2.08	0.57	0.90	1.23	0.74	1.32	1.89	0.23	0.33	0.43	0.67	1.02	1.37
								Mg	²⁺ stock	(Mg l	na ⁻¹)							
1	4 0.19	0.31ab	0.43	0.26	0.33b	0.40	0.10	0.22a	0.35	0.02	0.16ab	0.30	0.05	0.07bc	0.09	0.16	0.29a	0.42
2	4 0.39	0.56ab	0.72	0.34	0.43ab	0.52	0.09	0.21a	0.33	0.09	0.36a	0.62	0.05	0.07c	0.08	0.17	0.20a	0.22
3	4 0.36	0.69a	1.02	0.26	0.58ab	0.91	0.13	0.25a	0.37	0.16	0.20ab	0.24	0.08	0.09abc	0.10	0.12	0.27a	0.43
4	4 0.390	0.62ab	0.856	0.290	0.47ab	0.646	0.122	0.22a	0.325	0.04	0.22ab	0.41	0.05	0.07abc	0.09	0.185	0.26a	0.327
5	4 0.11	0.26b	0.40	0.04	0.43ab	0.83	0.15	0.23a	0.31	0.10	0.17ab	0.24	0.04	0.09bc	0.15	0.16	0.24a	0.33
6	4 0.30	0.45ab	0.60	0.30	0.42ab	0.55	0.12	0.21a	0.30	0.10	0.18ab	0.26	0.08	0.08abc	0.09	0.26	0.31a	0.36
7	4 0.211	0.38ab	0.543	0.327	0.43ab	0.535	0.137	0.22a	0.298	-0.30	0.40ab	1.10	0.08	0.11ab	0.13	0.197	0.27a	0.342
8	4 0.09	0.47ab	0.86	0.40	0.64a	0.89	0.14	0.21a	0.29	0.10	0.11b	0.13	0.084	0.10a	0.106	0.17	0.25a	0.34
Média	0.26	0.47	0.68	0.28	0.47	0.66	0.12	0.22	0.32	0.04	0.23	0.41	0.06	0.08	0.10	0.18	0.26	0.35
								Na	+ stock	(Mg h	a ⁻¹)							
1	4 0.02	0.04bc	0.06	0.00	0.03b	0.05	0.01	0.14a	0.27	0.06	0.15a	0.24	0.01ab	0.03	0.05	0.00	0.03a	0.06
2	4 0.02	0.08abc	0.13	0.01	0.03ab	0.07	0.10	0.17a	0.24	0.00	0.08ab	0.16	0.02ab	0.03	0.03	0.00	0.003b	0.01
3	4 0.07	0.26a	0.45	0.06	0.15ab	0.36	0.11	0.16a	0.20	0.05	0.06ab	0.08	0.04a	0.04	0.04	0.00	0.02ab	0.04
4	4 0.087	0.17ab	0.251	0.013	0.08ab	0.168	0.105	0.15a	0.203	0.06	0.07ab	0.09	0.02ab	0.03	0.04	0.001	0.01ab	0.029
5	4 0.01	0.01c	0.02	0.01	0.07ab	0.15	0.10	0.12a	0.14	0.05	0.06ab	0.07	0.00b	0.02	0.03	0.00	0.02ab	0.04
6	4 0.04	0.16ab	0.29	0.01	0.06ab	0.11	0.10	0.17a	0.24	0.04	0.10a	0.17	0.01b	0.02	0.02	0.00	0.02ab	0.03
7	4 0.007	0.09abc	0.188	0.036	0.11ab	0.185	0.087	0.13a	0.173	0.00	0.09ab	0.17	0.02ab	0.03	0.03	0.005	0.02ab	0.035
8	4 0.12	0.16ab	0.44	0.09	0.17a	0.25	0.05	0.10a	0.14	0.04	0.04b	0.05	0.018b	0.02	0.028	0.01	0.03a	0.04
Média	0.05	0.12	0.23	0.03	0.09	0.17	0.08	0.14	0.20	0.04	0.08	0.13	0.02	0.03	0.03	0.00	0.02	0.03

Médias (μ) na horizontal seguidas pela mesma letra para as diferentes paisagens não se diferem entre si ao nível de significância de (α < 0,05) pelo teste não paramétrico de Conover-Iman (comparação entre k amostras). α , 1- α – indicam o intervalo de confiança. Tempos: 1 (17/03/2020), 2 (04/06/2020), 3 (27/08/2020), 4 (10/12/2020), 5 (06/06/2021), 6 (14/10/2021), 7 (11/03/2022) e 8 (17/11/2022).

352

353

354

355

356

357

358

359

360

361362

363

364

365

366

367

368

As características químicas do solo para as áreas de CAA, REGE, OEM-S, OEM-A, IPA-A e DEFA mostraram diferenças significativas ao longo do tempo avaliado (p<0,05) (Tabela 5). Para o COT foram observadas variações ao longo do tempo para CAA, REGE, OEM-S, OEM-A e DEFA com valores médios de 8,75 g kg⁻¹ no tempo 2 com posterior redução de 63% para o tempo 3 (3,18 g kg⁻¹) na CAA. Para OEM-A a concentração de COT apresentou valores significativamente maiores no tempo 1, com valor médio de 12,85 g kg⁻¹ com redução de 45% para o tempo 3. Similarmente, as concentrações de P apresentaram variações para CAA, REGE, OEM-S, OEM-A e DEFA, com maiores médias no tempo 7 para CAA (10,90 mg dm⁻³), com decréscimos para o tempo 1 (1,04 mg dm⁻³) (p<0,05). Além disso, na REGE foram observadas menores concentrações de P para o tempo 2 (8,20 mg dm⁻³), com posterior aumento no tempo 5 (35,78 mg dm⁻³), enquanto na OEM-S as menores concentrações foram observadas no tempo 1 (6,46 mg dm⁻³), com as maiores médias no tempo 5 (28,21 mg dm⁻³) (p<0,05). Para OEM-A as maiores concentrações de P foram observadas no tempo 1 (75,24 mg dm⁻ ³), com reduções para os tempos 3, 5 e 6 (i.e., 26,42, 31,13 e 33,23 mg dm⁻³). Já na DEFA, o tempo 1 registrou a maior média com 52,63 mg P dm⁻³, com posterior redução no tempo

1 e 5. As concentrações de K⁺ apresentaram variações apenas para as áreas de OEM-S e OEM-A, com menores médias para o tempo 1, e com aumento para o tempo 2 na OEM-S, enquanto na OEM-A as maiores concentrações foram observadas no tempo 2 e 4, e menores concentrações no tempo 7.

Por sua vez, as concentrações de Mg²⁺ apresentaram variações para CAA, REGE, 373 374 OEM-A e IPA-A, de modo que, as maiores concentrações foram observadas no tempo 3 375 com média de 4,12 cmol_c dm⁻³, e com redução de 63% para o tempo 5 para CAA. Na 376 REGE, observou-se aumento de 98% do tempo 1 para o tempo 8, enquanto na OEM-A 377 as maiores concentrações foram observadas no tempo 2 (1,78 cmol_c dm⁻³) com reduções 378 de 217% para o tempo 8 (0,56 cmol_c dm⁻³). Na IPA-A observou-se aumentos do tempo 1 (0,35 cmol_c dm⁻³) para o tempo 7 (0,53 cmol_c dm⁻³) nas concentrações de Mg²⁺. Por outro 379 lado, as concentrações de Na⁺ variaram ao longo do tempo para CAA, REGE, OEM-A, 380 381 IPA-A e DEFA. Na CAA e IPA-A, as concentrações de Na⁺ foram maiores no tempo 3 com média de 0.83 cmol_c dm⁻³, reduzindo para 0.04 cmol_c dm⁻³ no tempo 5 para CAA, 382 383 enquanto na IPA-A a maior média foi de 0,10 cmol_c dm⁻³ no tempo 3, com redução para 384 o tempo 5 (média de 0,04 cmol_c dm⁻³). Em contrapartida, na REGE foram registradas 385 maiores concentrações no tempo 8 (média de 0,54 cmol_c dm⁻³) e menor média de 0,10 cmol_c dm⁻³ no tempo 2. Já na DEFA as menores médias foram de 0,01 cmol_c dm⁻³ no 386 387 tempo 2, enquanto a maior média foi de 0,09 cmol_c dm⁻³ no tempo 8. Para OEM-A, as maiores concentrações de Na⁺ foram de 0,39 cmol_c dm⁻³ no tempo 1, de modo que as 388 menores concentrações foram de 0,12 cmol_c dm⁻³ no tempo 8. Para as relações Ca²⁺/K⁺ e 389 (Ca²⁺+Mg²⁺)/K⁺ observou-se variações apenas para IPA-A, onde a maior média foi 390 391 registrada no tempo 3 com médias de 6,13 e 8,57, respectivamente, enquanto as menores 392 concentrações foram observadas no tempo 1 com média de 2,67 para Ca²⁺/K⁺ e 3,85 para 393 (Ca²⁺+Mg²⁺)/K⁺. Contrariamente, a relação Ca²⁺/Mg²⁺ mostrou variações para CAA, 394 REGE e DEFA. Assim, as maiores concentrações na CAA foram observadas no tempo 5 395 (4,64), com reduções no tempo 3 (1,34), enquanto na REGE as maiores concentrações 396 foram registradas no tempo 1 (2,53) com posterior redução no tempo 8 (1,80). Além disso, 397 na DEFA as maiores concentrações foram observadas no tempo 2, com reduções no 398 tempo 1.

399

369

370

371

372

Tabela 5. Características químicas do solo (carbono orgânico total – COT, fósforo – P,
 potássio – K⁺, cálcio – Ca²⁺, magnésio – Mg²⁺, sódio – Na⁺ e soma de bases – SB) em
 diferentes épocas do ano para Caatinga preservada (CAA), Caatinga em regeneração

403 (REGE), Orelha de Elefante Mexicana – Sertão (OEM-S), e Caatinga desmatada 404 (DEFA) em Floresta, Pernambuco, Brasil e Orelha de Elefante Mexicana – Agreste 405 (OEM-A), IPA-Sertânia – Agreste (IPA-A) em Pesqueira, Pernambuco, Brasil.

	+0	- ((OLW-A	,, 11 1			5.0	(1)						. J, D					
			CAA			REGE			OEM-S			OEM-A			IPA-A			DEFA	
Period_	n	α	μ	1-α	α	μ	1-α	α	μ	<u>1-α</u>	α	μ	1-α	α	μ	1-α	α	μ	1-α
_		2.00	4.06.1	5.02	1 47	7 1 c	0.05	2.64		T (g kg		12.05	1 6 00	4.70	7.57	10.42	2.02	2.25	2.70
1	4	3.09	4.06ab			5.16a			4.65a	5.67	8.81	12.85a						3.35a	
2	4	3.36	8.75a	14.14		8.13a			6.97a	13.92		10.17ab						6.38a	
3	4 4	2.48	3.18b 3.83ab	3.89	4.36 3.43	8.33a 7.00a			3.55a	4.15 4.67	4.88	7.06b			7.17a			3.24a 3.33a	
4 5	4	2.75 3.03	3.83ab 4.48ab	4.92 5.94					3.62a 3.69a	5.19	5.04 2.49	9.86ab 6.72ab						3.41a	
6	4	1.49	5.30ab	9.12	1.35	5.62a			3.38a	4.51	4.89	7.85ab						6.38a	
7	4	1.49	4.88ab	8.35	1.25	6.36a			3.89a	5.00	5.28	7.85ab						5.51a	
8	4	1.33	4.46ab	7.59	1.16				4.39a	5.48	9.60	10.03ab						4.64a	
Mean	7	3.09	4.06	5.03	1.47	5.16	8.85		4.65	5.67	8.81				7.57			3.35	
wican _		3.07	7.00	3.03	1.7/	5.10	0.03	3.04		P (mg o		12.03	10.07	7.70	7.57	10.73	2.73	3.33	3.70
1	4	0.63	6.56abc	12.50	0.00	22.89ab	51.29	0.13				75.24a	103.67	5.80	15.10a	24.40	0.00	15.00b	44.61
2	4	0.00	1.04d	2.26								186.78a							
3	4	0.79	1.79bcd									26.42b							
4	4	0.82	1.41cd	2.01								52.84ab							
5	4	2.09	7.30ab									31.13b							
6	4	0.59	8.37ab									33.26b							
7	4	0.91	10.90a									38.56ab							
8	4	4.09	5.03abcd																
Mean		1.22	5.30									62.62						18.43	
=									K	+ (cmol	dm ⁻³)								
1	4	0.11	0.22a	0.32	0.18	0.44a	0.69	0.10	0.13b	0.17	0.21	0.30ab	0.38	0.20	0.30a	0.40	0.00	0.44a	1.24
2	4	0.03	0.15a	0.28	0.07	0.32a	0.57	0.21	0.28a	0.35	0.00	0.55a	1.42	0.14	0.16b	0.18	0.14	0.29a	0.44
3	4	0.02	0.15a	0.27	0.10	0.57a	1.04	0.05	0.19ab	0.32	0.18	0.23b	0.27	0.15	0.18ab	0.20	0.00	0.33a	0.69
4	4	0.03	0.15a	0.27	0.19	0.46a	0.73	0.17	0.22ab	0.27	0.25	0.32a	0.38	0.15	0.21ab	0.27	0.10	0.28a	0.47
5	4	0.10	0.25a	0.40	0.29	0.51a	0.73	0.11	0.17ab	0.24	0.19	0.24ab	0.30	0.10	0.20ab	0.30	0.07	0.22a	0.37
6	4	0.07	0.24a	0.41	0.23	0.44a	0.64	0.17	0.24ab	0.31	0.22	0.23ab	0.25	0.15	0.19ab	0.23	0.11	0.29a	0.47
7	4	0.09	0.27a	0.44	0.23	0.34a	0.44	0.11	0.19ab	0.27	0.19	0.22b	0.26	0.16	0.34a	0.53	0.00	0.29a	0.58
8	4	0.00	0.14a	0.29	0.24	0.28a	0.32	0.04		0.28	0.25	0.27ab	0.28	0.16	0.27a	0.37	0.00	0.36a	0.93
Mean		0.06	0.20	0.34	0.19	0.42	0.65	0.12	0.20	0.28	0.19	0.29	0.44	0.15	0.23	0.31	0.05	0.31	0.65
_										²⁺ (cmo									
1	4	3.87	5.93a	7.99	4.30		5.45		3.47a	5.47	0.27	4.81a			0.79a	0.99		4.06a	6.20
2	4	3.98	5.51a	7.04	3.11		6.55		2.99a	4.46	3.67	5.21a			0.86a	1.34		3.49a	
3	4	3.03	5.41a	7.79		6.49a			3.36a	4.54	2.41	3.09a						4.00a	
4	4	4.89	5.46a	6.03		5.75a			3.25a	4.33	0.04				1.18a			3.98a	
5	4	4.72	6.39a						3.29a						0.86a				
6	4	5.26	7.08a			5.52a			3.37a	4.50	2.69	3.34a			0.96a			4.58a	
7	4	4.69	5.95a	7.21	4.44				3.44a	4.37	3.17	3.94a			1.18a			4.10a	
8	4	2.43	5.46a	8.49					3.67a	4.78	2.87	3.27a			1.07a			3.85a	
Mean		4.11	5.90	7.69	3.97	5.74	7.52	2.15	3.36	4.56		4.02	5.89	0.68	1.00	1.32	2.54	3.99	5.44
	4	1 10	1.04.1	2.54	1.70	1 021	2.20	0.60		2 ²⁺ (cmc			1 47	0.26	0.251	0.45	0.07	1.06	2.75
1	4	1.13	1.84ab			1.93b			1.36a	2.12	0.13	0.80ab						1.86a	
2	4	2.27	3.33ab			2.56ab			1.28a	2.01	0.53	1.78a			0.32b			1.27a	
3	4	1.93	4.12a	6.32		3.45ab			1.52a	2.26	0.86	0.99ab			0.43ab			1.77a	
4	4	2.16	3.73a	5.29		2.77ab			1.38a	1.99	0.07	1.16ab			0.35b			1.65a	
5	4	0.58	1.53b	2.47		2.57ab			1.42a	1.91	0.45	0.85ab			0.46ab			1.57a	
6	4	1.63	2.71ab	3.79		2.52ab			1.29a	1.84	0.55	0.89ab			0.41ab			2.00a	
7 8	4 4	1.20	2.25ab			2.57ab			1.34a	1.83	-1.35	1.99ab			0.53a			1.74a	
8 Mean	4	0.51 1.43	2.83ab 2.79			3.83a 2.78		0.85	1.32a 1.36	1.79 1.97	0.53 0.22	0.56b 1.13			0.47ab 0.42			1.64a 1.69	
wiean _		1.43	2.19	4.10	1.65	2.10	3.70	0.70		1.97 n+ (cmo)			2.03	0.31	0.42	0.32	1.10	1.09	2.27
1	4	0.06	0.12bc	0.10	0.01	0.084	0.15	0.04	0.46a				0.60	0.02	0.07aba	0.12	0.01	0.11a	0.21
1	4	0.00	0.1200	0.19	0.01	0.000	0.13	0.04	0.408	0.07	0.17	0.398	0.00	0.02	v.v/abc	0.12	0.01	U.11a	0.41

2	4	0.07	0.24abc	0.40	0.00	0.10b	0.23	0.31	0.54a	0.78	0.02	0.21ab	0.41	0.06	0.08abc	0.09	0.00	0.01b	0.02
3	4	0.20	0.83a			0.46ab			0.51a	0.66	0.14	0.16ab					0.00	0.07ab	0.15
4	4	0.26	0.53ab	0.81		0.24ab			0.50a	0.66	0.16	0.20ab			0.08ab			0.05ab	
5	4	0.02	0.04c	0.06		0.21ab			0.38a	0.46	0.14	0.16ab			0.04c			0.07ab	
6	4	0.09	0.52ab	0.96		0.19ab			0.57a	0.80	0.08	0.28a						0.05ab	0.09
7	4	0.00	0.29abc	0.59		0.35ab		0.28	0.42a	0.57	0.02	0.23ab			0.07abc			0.07ab	
8	4	0.00	0.51ab			0.54a			0.32a	0.47	0.11	0.12b			0.06bc			0.09a	
Mean		0.09	0.38	0.73	0.06	0.27	0.52	0.27	0.46	0.66	0.10	0.22	0.33	0.05	0.07	0.09	0.01	0.07	0.12
										SB									
1	4	5.45	8.11a			7.33a			5.43a	8.56	1.01	6.29ab						6.47a	
2	4	8.33	9.22a			7.81a			5.09a	7.52	4.52				1.42a			5.06a	
3	4	5.48	10.51a						5.58a	7.51	3.91	4.47ab						6.18a	
4	4	7.73	9.87a			9.22a			5.35a	7.10	0.61	7.13ab							7.68
5	4	6.06	8.20a			9.43a			5.27a	6.42	3.15	4.33ab							7.37
6	4	7.42	10.56a						5.46a	7.17	4.25	4.75ab						6.93a	
7	4	6.36				8.75a			5.40a	6.77	2.21	6.38ab							7.69
8	4	2.93				11.48a			5.47a		3.85				1.87a				7.33
Mean		6.22	9.27	12.32	6.33	9.21	12.09	3.52	5.38	7.24		5.67	8.39	1.28	1.72	2.16	4.27	6.06	7.84
1	4.00	7.22	20.54	52.75	4.01	10.56	20.02	7.20	27.60	Ca ²⁺ /.		17.07	24.61	2.10	2.67	2.15	0.00	22.40	52.60
1		7.33										17.37a							
2		18.74										14.71a							
3		8.10										13.64a							
4		16.77																18.04a	
5		14.10																	
6 7		4.99 2.99										14.33a 17.95a							
8		0.00	58.04a																
o Mean		9.12							19.96									18.91	
Mean		7.12	37.40	12.03	0.44	10.41	20.73	0.54			7.01	14.77	22.31	3.31	4.03	0.00	1.01	10.71	36.12
										C_{2}^{2+}/N	$I_{\alpha^{2+}}$								
1		2 64	3 25ah	3 87	2 33	2 53a	2 73			$\frac{\text{Ca}^{2+}/\text{N}}{2.88}$		5 51a	9.43	2 19	2 26a	2 34	1 98	2 16h	2 35
1 2	4 4	2.64	3.25ab 1.76cde					2.19	2.54a	2.88	1.59	5.51a 3.20a			2.26a 2.61a			2.16b 2.77a	
2	4	0.59	1.76cde	2.94	1.70	1.88ab	2.06	2.19 2.12	2.54a 2.37a	2.88 2.62	1.59 1.76	3.20a	4.65	1.71	2.61a	3.52	2.48	2.77a	3.06
2 3		0.59 1.15	1.76cde 1.34e	2.94 1.53	1.70 1.39	1.88ab 1.97ab	2.06 2.55	2.19 2.12 1.93	2.54a 2.37a 2.25a	2.88 2.62 2.58	1.59 1.76 2.11	3.20a 3.17a	4.65 4.23	1.71 1.90	2.61a 2.55a	3.52 3.20	2.48 1.78	2.77a 2.19b	3.06 2.60
2 3 4	4 4	0.59	1.76cde 1.34e 1.55de	2.94 1.53 2.22	1.70 1.39 1.61	1.88ab	2.06 2.55 2.71	2.19 2.12 1.93 2.04	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a	2.88 2.62 2.58 2.80	1.59 1.76 2.11 3.66	3.20a 3.17a 4.67a	4.65 4.23 5.69	1.71 1.90 2.35	2.61a 2.55a 3.46a	3.52 3.20 4.58	2.481.782.27	2.77a 2.19b 2.43ab	3.06 2.60 2.59
2 3	4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00	1.76cde 1.34e	2.94 1.53 2.22 7.28	1.70 1.39 1.61 1.65	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a	2.06 2.55 2.71 3.43	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68	2.54a 2.37a 2.25a	2.88 2.62 2.58	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12	3.20a 3.17a	4.65 4.23 5.69 5.45	1.71 1.90 2.35 1.21	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a	3.52 3.20 4.58 2.77	2.48 1.78 2.27 2.26	2.77a 2.19b	3.06 2.60 2.59 2.69
2 3 4 5	4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55
2 3 4 5 6	4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47
2 3 4 5 6 7	4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.59	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47
2 3 4 5 6 7 8	4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.59	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63
2 3 4 5 6 7 8	4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.59 1.74	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ^{2+/} 18.76	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K+	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99 3.20	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08 2.14	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62
2 3 4 5 6 7 8 Mean	4 4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41 1.60	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54 9.53a 27.64a	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47 17.34 53.51	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.59 1.74	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17 5.02a 9.26a	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61 8.54 15.58	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a 2.50	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ^{2+/} 18.76 6.14	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K ⁺ 0.53 1.77	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a 4.17 2.79ab 4.28ab	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a 2.47 1.18b 2.01ab	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 2.99 3.20 1.36 2.34	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08 2.14	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab 2.38	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62 23.43 7.38
2 3 4 5 6 7 8 Mean	4 4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41 1.60 1.72 1.76 4.41	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54 9.53a 27.64a 36.09a	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47 17.34 53.51 67.76	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.59 1.74 1.50 2.94 0.00	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17 5.02a 9.26a 7.99a	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61 8.54 15.58 16.10	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11 2.90 2.79 1.31	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a 2.50 10.83a 4.46a 9.87a	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ^{2+/} 6.14 18.43	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K ⁺ 0.53 1.77 3.20	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a 4.17 2.79ab 4.28ab 4.41a	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01 5.05 6.79 5.63	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73 1.00 1.68 2.00	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a 2.47 1.18b 2.01ab 2.44a	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99 3.20 1.36 2.34 2.87	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08 2.14 0.00 2.06 0.00	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab 2.38 10.07a 4.72a 8.27a	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62 23.43 7.38 18.82
2 3 4 5 6 7 8 Mean 1 2 3 4	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41 1.60 1.72 1.76 4.41 5.92	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54 9.53a 27.64a 36.09a 31.86a	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47 17.34 53.51 67.76 57.80	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.74 1.50 2.94 0.00 1.76	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17 5.02a 9.26a 7.99a 7.39a	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61 8.54 15.58 16.10 13.03	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11 2.90 2.79 1.31 2.41	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a 2.50 10.83a 4.46a 9.87a 7.24a	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ^{2+/} 6.14 18.43 12.08	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K ⁺ 0.53 1.77 3.20 0.83	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a 4.17 2.79ab 4.28ab 4.41a 3.57ab	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01 5.05 6.79 5.63 6.31	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73 1.68 2.00 0.81	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a 2.47 1.18b 2.01ab 2.44a 1.72ab	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99 3.20 1.36 2.34 2.87 2.63	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08 2.14 0.00 2.06 0.00 0.75	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab 2.38 10.07a 4.72a 8.27a 7.40a	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62 23.43 7.38 18.82 14.06
2 3 4 5 6 7 8 Mean 1 2 3 4 5	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41 1.60 1.72 1.76 4.41 5.92 0.61	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54 9.53a 27.64a 36.09a 31.86a 7.15a	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47 17.34 53.51 67.76 57.80 14.92	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.74 1.50 2.94 0.00 1.76 0.00	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17 5.02a 9.26a 7.99a 7.39a 6.07a	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61 8.54 15.58 16.10 13.03 14.50	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11 2.90 2.79 1.31 2.41 2.27	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a 2.50 10.83a 4.46a 9.87a 7.24a 8.97a	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ^{2+/} 6.14 18.43 12.08 15.67	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K ⁺ 0.53 1.77 3.20 0.83 2.10	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a 4.17 2.79ab 4.28ab 4.41a 3.57ab 3.50ab	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01 5.05 6.79 5.63 6.31 4.90	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73 1.00 1.68 2.00 0.81 0.89	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a 2.47 1.18b 2.01ab 2.44a 1.72ab 2.43ab	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99 3.20 1.36 2.34 2.87 2.63 3.96	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08 2.14 0.00 0.75 1.20	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab 2.38 10.07a 4.72a 8.27a 7.40a 8.58a	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62 23.43 7.38 18.82 14.06 15.97
2 3 4 5 6 7 8 Mean 1 2 3 4 5	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41 1.60 1.72 1.76 4.41 5.92 0.61 0.58	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54 9.53a 27.64a 36.09a 31.86a 7.15a 13.87a	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47 17.34 53.51 67.76 57.80 14.92 27.16	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.74 1.50 2.94 0.00 1.76 0.00 2.59	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17 5.02a 9.26a 7.99a 7.39a 6.07a 6.25a	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61 8.54 15.58 16.10 13.03 14.50 9.91	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11 2.90 2.79 1.31 2.41 2.27 2.22	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a 2.50 10.83a 4.46a 9.87a 7.24a 8.97a 5.67a	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ^{2+/} 6.14 18.43 12.08 15.67 9.11	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K ⁺ 0.53 1.77 3.20 0.83 2.10 2.39	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a 4.17 2.79ab 4.28ab 4.41a 3.57ab 3.50ab 3.83a	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01 5.05 6.79 5.63 6.31 4.90 5.28	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73 1.68 2.00 0.81 0.89 1.75	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a 2.47 1.18b 2.01ab 2.44a 1.72ab 2.43ab 2.19ab	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99 3.20 1.36 2.34 2.87 2.63 3.96 2.63	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08 2.14 0.00 0.75 1.20 1.64	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab 2.38 10.07a 4.72a 8.27a 7.40a 8.58a 8.04a	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62 23.43 7.38 18.82 14.06 15.97 14.44
2 3 4 5 6 7 8 Mean 1 2 3 4 5 6 7	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41 1.60 1.72 1.76 4.41 5.92 0.61 0.58 0.00	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54 9.53a 27.64a 36.09a 31.86a 7.15a 13.87a 14.50a	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47 17.34 53.51 67.76 57.80 14.92 27.16 31.34	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.74 1.50 2.94 0.00 1.76 0.00 2.59 6.10	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17 5.02a 9.26a 7.99a 7.39a 6.07a 6.25a 9.25a	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61 8.54 15.58 16.10 13.03 14.50 9.91 12.41	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11 2.90 2.79 1.31 2.27 2.22 2.37	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a 2.50 10.83a 4.46a 9.87a 7.24a 8.97a 5.67a 8.14a	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ^{2+/} 18.76 6.14 18.43 12.08 15.67 9.11 13.92	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K ⁺ 0.53 1.77 3.20 0.83 2.10 2.39 0.00	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a 4.17 2.79ab 4.28ab 4.41a 3.57ab 3.50ab 3.83a 9.59ab	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01 5.05 6.79 5.63 6.31 4.90 5.28 27.15	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73 1.00 1.68 2.00 0.81 0.89 1.75 0.30	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a 2.47 1.18b 2.01ab 2.44a 1.72ab 2.43ab 2.19ab 1.77ab	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99 3.20 1.36 2.34 2.87 2.63 3.96 2.63 3.23	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08 2.14 0.00 0.75 1.20 1.64 0.68	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab 2.38 10.07a 4.72a 8.27a 7.40a 8.58a 8.04a 8.26a	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62 23.43 7.38 18.82 14.06 15.97 14.44 15.84
2 3 4 5 6 7 8 Mean 1 2 3 4 5 6 7 8	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41 1.60 1.72 1.76 4.41 5.92 0.61 0.58 0.00 17.16	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54 9.53a 27.64a 36.09a 31.86a 7.15a 13.87a 14.50a 31.95a	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47 17.34 53.51 67.76 57.80 14.92 27.16 31.34 81.07	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.74 1.50 2.94 0.00 1.76 0.00 2.59 6.10 6.72	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17 5.02a 9.26a 7.99a 7.39a 6.07a 6.25a 9.25a 13.88a	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61 8.54 15.58 16.10 13.03 14.50 9.91 12.41 21.03	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11 2.90 2.79 1.31 2.27 2.22 2.37 1.73	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a 2.50 10.83a 4.46a 9.87a 7.24a 8.97a 5.67a 8.14a 9.79a	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ^{2+/} 18.76 6.14 18.43 12.08 15.67 9.11 13.92 17.85	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K ⁺ 0.53 1.77 3.20 0.83 2.10 2.39 0.00 2.05	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a 4.17 2.79ab 4.28ab 4.41a 3.57ab 3.50ab 3.83a 9.59ab 2.11b	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01 5.05 6.79 5.63 6.31 4.90 5.28 27.15 2.18	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73 1.00 1.68 2.00 0.81 0.89 1.75 0.30 1.16	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a 2.47 1.18b 2.01ab 2.44a 1.72ab 2.43ab 2.19ab 1.77ab 1.98ab	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99 3.20 1.36 2.34 2.87 2.63 3.96 2.63 3.23 2.80	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08 2.14 0.00 0.75 1.20 1.64 0.68 0.00	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab 2.38 10.07a 4.72a 8.27a 7.40a 8.58a 8.04a 8.26a 8.15a	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62 23.43 7.38 18.82 14.06 15.97 14.44 15.84 17.22
2 3 4 5 6 7 8 Mean 1 2 3 4 5 6 7	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41 1.60 1.72 1.76 4.41 5.92 0.61 0.58 0.00	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54 9.53a 27.64a 36.09a 31.86a 7.15a 13.87a 14.50a	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47 17.34 53.51 67.76 57.80 14.92 27.16 31.34	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.74 1.50 2.94 0.00 1.76 0.00 2.59 6.10 6.72	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17 5.02a 9.26a 7.99a 7.39a 6.07a 6.25a 9.25a	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61 8.54 15.58 16.10 13.03 14.50 9.91 12.41 21.03	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11 2.90 2.79 1.31 2.27 2.22 2.37 1.73	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a 2.50 10.83a 4.46a 9.87a 7.24a 8.97a 5.67a 8.14a 9.79a 8.12	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ^{2+/} 18.76 6.14 18.43 12.08 15.67 9.11 13.92 17.85 13.99	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K ⁺ 0.53 1.77 3.20 0.83 2.10 2.39 0.00 2.05 1.60	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a 4.17 2.79ab 4.28ab 4.41a 3.57ab 3.50ab 3.83a 9.59ab	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01 5.05 6.79 5.63 6.31 4.90 5.28 27.15 2.18	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73 1.00 1.68 2.00 0.81 0.89 1.75 0.30 1.16	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a 2.47 1.18b 2.01ab 2.44a 1.72ab 2.43ab 2.19ab 1.77ab 1.98ab	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99 3.20 1.36 2.34 2.87 2.63 3.96 2.63 3.23 2.80	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08 2.14 0.00 0.75 1.20 1.64 0.68	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab 2.38 10.07a 4.72a 8.27a 7.40a 8.58a 8.04a 8.26a	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62 23.43 7.38 18.82 14.06 15.97 14.44 15.84 17.22
2 3 4 5 6 7 8 Mean 1 2 3 4 5 6 7 8 Mean	4 4 4 4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41 1.60 1.72 1.76 4.41 5.92 0.61 0.58 0.00 17.16 4.02	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54 9.53a 27.64a 36.09a 31.86a 7.15a 13.87a 14.50a 31.95a 21.57	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47 17.34 53.51 67.76 57.80 14.92 27.16 31.34 81.07 43.86	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.74 1.50 2.94 0.00 1.76 0.00 2.59 6.10 6.72 2.70	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17 5.02a 9.26a 7.99a 7.39a 6.07a 6.25a 9.25a 13.88a 8.14	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61 8.54 15.58 16.10 13.03 14.50 9.91 12.41 21.03 13.89	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11 2.90 2.79 1.31 2.27 2.22 2.37 1.73 2.25	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a 2.50 10.83a 4.46a 9.87a 7.24a 8.97a 5.67a 8.14a 9.79a 8.12	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ²⁺ / 18.76 6.14 18.43 12.08 15.67 9.11 13.92 17.85 13.99 [a ²⁺ +Mg ²⁺]	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K ⁺ 0.53 1.77 3.20 0.83 2.10 2.39 0.00 2.05 1.60 2.2 ²⁺)/K ⁺	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a 4.17 2.79ab 4.28ab 4.41a 3.57ab 3.50ab 3.83a 9.59ab 2.11b 4.26	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01 5.05 6.79 5.63 6.31 4.90 5.28 27.15 2.18 7.91	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73 1.00 1.68 2.00 0.81 0.89 1.75 0.30 1.16 1.20	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a 2.47 1.18b 2.01ab 2.44a 1.72ab 2.43ab 2.19ab 1.77ab 1.98ab 1.96	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99 3.20 1.36 2.34 2.87 2.63 3.96 2.63 3.23 2.80 2.73	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08 2.14 0.00 2.06 0.00 0.75 1.20 1.64 0.68 0.00 0.79	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab 2.38 10.07a 4.72a 8.27a 7.40a 8.58a 8.04a 8.26a 8.15a 7.94	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62 23.43 7.38 18.82 14.06 15.97 14.44 17.22 15.89
2 3 4 5 6 7 8 Mean 1 2 3 4 5 6 7 8 Mean	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41 1.60 1.72 1.76 4.41 5.92 0.61 0.58 0.00 17.16 4.02	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54 9.53a 27.64a 36.09a 31.86a 7.15a 13.87a 14.50a 31.95a 21.57	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47 17.34 53.51 67.76 57.80 14.92 27.16 31.34 81.07 43.86	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.74 1.50 2.94 0.00 1.76 0.00 2.59 6.10 6.72 2.70	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17 5.02a 9.26a 7.99a 7.39a 6.07a 6.25a 9.25a 13.88a 8.14	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61 8.54 15.58 16.10 13.03 14.50 9.91 12.41 21.03 13.89	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11 2.90 2.79 1.31 2.41 2.27 2.22 2.37 1.73 2.25	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a 2.50 10.83a 4.46a 9.87a 7.24a 8.97a 5.67a 8.14a 9.79a 8.12 (C	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ^{2+/} 18.76 6.14 18.43 12.08 15.67 9.11 13.92 17.85 13.99 (a ²⁺ +Mg	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K ⁺ 0.53 1.77 3.20 0.83 2.10 2.39 0.00 2.05 1.60 2 ²⁺)/K ⁺	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a 4.17 2.79ab 4.28ab 4.41a 3.57ab 3.50ab 3.83a 9.59ab 2.11b 4.26	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01 5.05 6.79 5.63 6.31 4.90 5.28 27.15 2.18 7.91	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73 1.00 1.68 2.00 0.81 0.89 1.75 0.30 1.16 1.20	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a 2.47 1.18b 2.01ab 2.44a 1.72ab 2.43ab 2.19ab 1.77ab 1.98ab 1.96	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99 3.20 1.36 2.34 2.87 2.63 3.96 2.63 3.23 2.80 2.73	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08 2.14 0.00 2.06 0.00 0.75 1.20 1.64 0.68 0.09 0.79	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab 2.38 10.07a 4.72a 8.27a 7.40a 8.58a 8.04a 8.26a 8.15a 7.94	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62 23.43 7.38 18.82 14.06 15.97 14.44 17.22 15.89
2 3 4 5 6 7 8 Mean 1 2 3 4 5 6 7 8 Mean	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41 1.60 1.72 1.76 4.41 5.92 0.61 0.58 0.00 17.16 4.02	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54 9.53a 27.64a 36.09a 31.86a 7.15a 13.87a 14.50a 31.95a 21.57	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47 17.34 53.51 67.76 57.80 14.92 27.16 31.34 81.07 43.86	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.74 1.50 2.94 0.00 1.76 0.00 2.59 6.10 6.72 2.70	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17 5.02a 9.26a 7.99a 7.39a 6.07a 6.25a 9.25a 13.88a 8.14	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61 8.54 15.58 16.10 13.03 14.50 9.91 12.41 21.03 13.89 29.36 43.02	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11 2.90 2.79 1.31 2.27 2.22 2.37 1.73 2.25	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a 2.50 10.83a 4.46a 9.87a 7.24a 8.97a 5.67a 8.14a 9.79a 8.12 (C	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ^{2+/} 18.76 6.14 18.43 12.08 15.67 9.11 13.92 17.85 13.99 12 ²⁺ +Mg 66.81 19.78	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K ⁺ 0.53 1.77 3.20 0.83 2.10 2.39 0.00 2.05 1.60 2 ²⁺)/K ⁺ 0.85 3.77	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a 4.17 2.79ab 4.28ab 4.41a 3.57ab 3.50ab 3.83a 9.59ab 2.11b 4.26	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01 5.05 6.79 5.63 6.31 4.90 5.28 27.15 2.18 7.91	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73 1.00 1.68 2.00 0.81 0.89 1.75 0.30 1.16 1.20	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a 2.47 1.18b 2.01ab 2.44a 1.72ab 2.43ab 2.19ab 1.77ab 1.98ab 1.96	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99 3.20 1.36 2.34 2.87 2.63 3.96 2.63 3.23 2.80 2.73	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08 2.14 0.00 2.06 0.00 0.75 1.20 1.64 0.68 0.00 0.79	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab 2.38 10.07a 4.72a 8.27a 7.40a 8.58a 8.04a 8.26a 8.15a 7.94	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62 23.43 7.38 18.82 14.06 15.97 14.44 17.22 15.89 77.11 27.87
2 3 4 5 6 7 8 Mean 1 2 3 4 5 6 7 8 Mean	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41 1.60 1.76 4.41 5.92 0.61 0.58 0.00 17.16 4.02 9.16 20.63 12.52	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54 9.53a 27.64a 36.09a 31.86a 7.15a 13.87a 14.50a 31.95a 21.57	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47 17.34 53.51 67.76 57.80 14.92 27.16 31.34 81.07 43.86 70.97 116.11 152.97	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.74 1.50 2.94 0.00 1.76 0.00 2.59 6.10 6.72 2.70 5.82 9.74 0.50	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17 5.02a 9.26a 7.99a 7.39a 6.07a 6.25a 9.25a 13.88a 8.14 17.59a 26.38a 22.70a	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61 8.54 15.58 16.10 13.03 14.50 9.91 12.41 21.03 13.89 29.36 43.02 44.90	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11 2.90 2.79 1.31 2.41 2.27 2.22 2.37 1.73 2.25 10.23 10.09 6.34	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a 2.50 10.83a 4.46a 9.87a 7.24a 8.97a 5.67a 8.14a 9.79a 8.12 (C 38.52a 14.93a 31.32a	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ^{2+/} 18.76 6.14 18.43 12.08 15.67 9.11 13.92 17.85 13.99 12 ²⁺ +Mg 66.81 19.78 56.30	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K ⁺ 0.53 1.77 3.20 0.83 2.10 2.39 0.00 2.05 1.60 2 ²⁺)/K ⁺ 0.85 3.77 15.79	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a 4.17 2.79ab 4.28ab 4.41a 3.57ab 3.50ab 3.83a 9.59ab 2.11b 4.26 20.16a 18.99a 18.06a	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01 5.05 6.79 5.63 6.31 4.90 5.28 27.15 2.18 7.91	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73 1.68 2.00 0.81 0.89 1.75 0.30 1.16 1.20	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a 2.47 1.18b 2.01ab 2.44a 1.72ab 2.43ab 2.19ab 1.77ab 1.98ab 1.96 3.85b 7.30ab 8.57a	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99 3.20 1.36 2.34 2.87 2.63 3.96 2.63 3.23 2.80 2.73 4.51 9.98 9.18	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08 2.14 0.00 0.75 1.20 1.64 0.68 0.00 0.79	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab 2.38 10.07a 4.72a 8.27a 7.40a 8.58a 8.04a 8.26a 8.15a 7.94 32.55a 17.75a 27.63a	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62 23.43 7.38 18.82 14.06 15.97 14.44 15.84 17.22 15.89 77.11 27.87 64.63
2 3 4 5 6 7 8 Mean 1 2 3 4 5 6 7 8 Mean	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41 1.60 1.72 1.76 4.41 5.92 0.61 0.58 0.00 17.16 4.02 9.16 20.63 12.52 22.70	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54 9.53a 27.64a 36.09a 31.86a 7.15a 13.87a 14.50a 31.95a 21.57 40.07a 68.37a 82.75a 75.56a	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47 17.34 53.51 67.76 57.80 14.92 27.16 31.34 81.07 43.86 70.97 116.11 152.97 128.42	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.74 1.50 2.94 0.00 1.76 0.00 2.59 6.10 6.72 2.70 5.82 9.74 0.50 6.99	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17 5.02a 9.26a 7.99a 7.39a 6.07a 6.25a 9.25a 13.88a 8.14 17.59a 26.38a 22.70a 22.21a	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61 8.54 15.58 16.10 13.03 14.50 9.91 12.41 21.03 13.89 29.36 43.02 44.90 37.43	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11 2.90 2.79 1.31 2.27 2.22 2.37 1.73 2.25 10.23 10.09 6.34 9.74	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a 2.50 10.83a 4.46a 9.87a 7.24a 8.97a 5.67a 8.14a 9.79a 8.12 (C 38.52a 14.93a 31.32a 24.08a	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ^{2+/} 18.76 6.14 18.43 12.08 15.67 9.11 13.92 17.85 13.99 a ²⁺ + Mg 66.81 19.78 56.30 38.43	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K ⁺ 0.53 1.77 3.20 0.83 2.10 2.39 0.00 2.05 1.60 2.2 ²⁺)/K ⁺ 0.85 3.77 15.79 3.60	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a 4.17 2.79ab 4.28ab 4.41a 3.57ab 3.50ab 3.83a 9.59ab 2.11b 4.26 20.16a 18.99a 18.06a 20.53a	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01 5.05 6.79 5.63 6.31 4.90 5.28 27.15 2.18 7.91 39.48 34.22 20.32 37.46	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73 1.68 2.00 0.81 0.89 1.75 0.30 1.16 1.20 3.19 4.61 7.95 5.54	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a 2.47 1.18b 2.01ab 2.44a 1.72ab 2.43ab 2.19ab 1.77ab 1.98ab 1.96 3.85b 7.30ab 8.57a 7.40ab	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99 3.20 1.36 2.34 2.87 2.63 3.96 2.63 3.23 2.80 2.73 4.51 9.98 9.18 9.26	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08 2.14 0.00 0.75 1.20 1.64 0.68 0.00 0.79	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab 2.38 10.07a 4.72a 8.27a 7.40a 8.58a 8.04a 8.26a 8.15a 7.94 32.55a 17.75a 27.63a 25.44a	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62 23.43 7.38 18.82 14.06 15.97 14.44 17.22 15.89 77.11 27.87 64.63 48.79
2 3 4 5 6 7 8 Mean 1 2 3 4 5 6 7 8 Mean	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41 1.60 1.72 1.76 4.41 5.92 0.61 0.58 0.00 17.16 4.02 9.16 20.63 12.52 22.70 13.52	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54 9.53a 27.64a 36.09a 31.86a 7.15a 13.87a 14.50a 31.95a 21.57 40.07a 68.37a 82.75a 75.56a 34.58a	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47 17.34 53.51 67.76 57.80 14.92 27.16 31.34 81.07 43.86 70.97 116.11 152.97 128.42 55.65	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.74 1.50 2.94 0.00 1.76 0.00 2.59 6.10 6.72 2.70 5.82 9.74 0.50 6.99 0.00	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17 5.02a 9.26a 7.99a 7.39a 6.07a 6.25a 9.25a 13.88a 8.14 17.59a 26.38a 22.70a 22.21a 20.09a	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61 8.54 15.58 16.10 13.03 14.50 9.91 12.41 21.03 13.89 29.36 43.02 44.90 37.43 45.31	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11 2.90 2.79 1.31 2.27 2.22 2.37 1.73 2.25 10.23 10.09 6.34 9.74 8.16	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a 2.50 10.83a 4.46a 9.87a 7.24a 8.97a 5.67a 8.14a 9.79a 8.12 (C 38.52a 14.93a 31.32a 24.08a 29.71a	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ^{2+/} 18.76 6.14 18.43 12.08 15.67 9.11 13.92 17.85 13.99 a ²⁺ +Mg 66.81 19.78 56.30 38.43 51.26	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K ⁺ 0.53 1.77 3.20 0.83 2.10 2.39 0.00 2.05 1.60 2.15 1.60 2.75 1.60 2.75 1.77	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a 4.17 2.79ab 4.28ab 4.41a 3.57ab 3.50ab 3.83a 9.59ab 2.11b 4.26 20.16a 18.99a 18.06a 20.53a 16.14a	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01 5.05 6.79 5.63 6.31 4.90 5.28 27.15 2.18 7.91 39.48 34.22 20.32 37.46 18.52	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73 1.00 1.68 2.00 0.81 0.89 1.75 0.30 1.16 1.20 3.19 4.61 7.95 5.54 2.96	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a 2.47 1.18b 2.01ab 2.44a 1.72ab 2.43ab 2.19ab 1.77ab 1.98ab 1.96 3.85b 7.30ab 8.57a 7.40ab 7.10ab	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99 3.20 1.36 2.34 2.87 2.63 3.96 2.63 3.23 2.80 2.73 4.51 9.98 9.18 9.26 11.25	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08 2.14 0.00 0.75 1.20 1.64 0.68 0.00 0.79 0.00 7.64 0.00 2.10 4.96	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab 2.38 10.07a 4.72a 8.27a 7.40a 8.58a 8.04a 8.26a 8.15a 7.94 32.55a 17.75a 27.63a 25.44a 29.59a	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62 23.43 7.38 18.82 14.06 15.97 14.44 17.22 15.89 77.11 27.87 64.63 48.79 54.23
2 3 4 5 6 7 8 Mean 1 2 3 4 5 6 7 8 Mean	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41 1.60 1.72 1.76 4.41 5.92 0.61 0.58 0.00 17.16 4.02 9.16 20.63 12.52 22.70 13.52 5.62	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54 9.53a 27.64a 36.09a 31.86a 7.15a 13.87a 14.50a 31.95a 21.57 40.07a 68.37a 82.75a 75.56a 34.58a 49.24a	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47 17.34 53.51 67.76 57.80 14.92 27.16 31.34 81.07 43.86 70.97 116.11 152.97 128.42 55.65 92.86	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.74 1.50 2.94 0.00 1.76 0.00 2.59 6.10 6.72 2.70 5.82 9.74 0.50 6.99 0.00 10.31	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17 5.02a 9.26a 7.99a 7.39a 6.07a 6.25a 9.25a 13.88a 8.14 17.59a 26.38a 22.70a 22.21a 20.09a 19.66a	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61 8.54 15.58 16.10 13.03 14.50 9.91 12.41 21.03 13.89 29.36 43.02 44.90 37.43 45.31 29.02	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11 2.90 2.79 1.31 2.41 2.27 2.22 2.37 1.73 2.25 10.23 10.09 6.34 9.74 8.16 9.22	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a 2.50 10.83a 4.46a 9.87a 7.24a 8.97a 5.67a 8.14a 9.79a 8.12 (C 38.52a 14.93a 31.32a 24.08a 29.71a 20.38a	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ^{2+/} 18.76 6.14 18.43 12.08 15.67 9.11 13.92 17.85 13.99 a ²⁺ +Mg 66.81 19.78 56.30 38.43 51.26 31.53	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K ⁺ 0.53 1.77 3.20 0.83 2.10 2.39 0.00 2.05 1.60 2.15/(K ⁺)/(K ⁺) 0.85 3.77 15.79 3.60 13.75 16.30	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a 4.17 2.79ab 4.28ab 4.41a 3.57ab 3.50ab 3.83a 9.59ab 2.11b 4.26 20.16a 18.99a 18.06a 20.53a 16.14a 18.16a	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01 5.05 6.79 5.63 6.31 4.90 5.28 27.15 2.18 7.91 39.48 34.22 20.32 37.46 18.52 20.02	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73 1.00 1.68 2.00 0.81 0.89 1.75 0.30 1.16 1.20 3.19 4.61 7.95 5.54 2.96 5.49	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a 2.47 1.18b 2.01ab 2.44a 1.72ab 2.43ab 2.19ab 1.77ab 1.98ab 1.96 3.85b 7.30ab 8.57a 7.40ab 7.20ab	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99 3.20 1.36 2.34 2.87 2.63 3.96 2.63 3.23 2.80 2.73 4.51 9.98 9.18 9.26 11.25 8.90	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.14 0.00 2.06 0.00 0.75 1.20 1.64 0.68 0.00 0.79 0.00 7.64 0.00 2.10 4.96 3.71	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab 2.38 10.07a 4.72a 8.27a 7.40a 8.58a 8.04a 8.26a 8.15a 7.94 32.55a 17.75a 27.63a 25.44a 29.59a 26.79a	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62 23.43 7.38 18.82 14.06 15.97 14.44 17.22 15.89 77.11 27.87 64.63 48.79 54.23 49.87
2 3 4 5 6 7 8 Mean 1 2 3 4 5 6 7 8 Mean 1 2 3 4 5 6 7 8 7 8 8 6 7 7 8 8 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41 1.60 1.72 1.76 4.41 5.92 0.61 0.58 0.00 17.16 4.02 9.16 20.63 12.52 22.70 13.52 5.62 0.66	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54 9.53a 27.64a 36.09a 31.86a 7.15a 13.87a 14.50a 31.95a 21.57 40.07a 68.37a 82.75a 75.56a 34.58a 49.24a 47.85a	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47 17.34 53.51 67.76 57.80 14.92 27.16 31.34 81.07 43.86 70.97 116.11 152.97 128.42 55.65 92.86 95.05	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.74 1.50 2.94 0.00 1.76 0.00 2.59 6.10 6.72 2.70 5.82 9.74 0.50 6.99 0.00 10.31 18.96	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17 5.02a 9.26a 7.99a 7.39a 6.07a 6.25a 9.25a 13.88a 8.14 17.59a 22.70a 22.21a 20.09a 19.66a 29.20a	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61 8.54 15.58 16.10 13.03 14.50 9.91 12.41 21.03 13.89 29.36 44.90 37.43 45.31 29.02 39.45	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11 2.90 2.79 1.31 2.41 2.27 2.37 1.73 2.25 10.23 10.09 6.34 9.74 8.16 9.22 9.63	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a 2.50 10.83a 4.46a 9.87a 7.24a 8.97a 5.67a 8.14a 9.79a 8.12 (C 38.52a 14.93a 31.32a 24.08a 29.71a 20.38a 28.94a	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ^{2+/} 18.76 6.14 18.43 12.08 15.67 9.11 13.92 17.85 13.99 a ²⁺ +Mg 66.81 19.78 56.30 38.43 51.26 31.53 48.25	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K ⁺ 0.53 1.77 3.20 0.83 2.10 2.39 0.00 2.05 1.60 c ²⁺)/K ⁺ 0.85 3.77 15.79 3.60 13.75 16.30 4.50	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a 4.17 2.79ab 4.28ab 4.41a 3.57ab 3.50ab 3.83a 9.59ab 2.11b 4.26 20.16a 18.99a 18.06a 20.53a 16.14a 18.16a 27.53a	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01 5.05 6.79 5.63 6.31 4.90 5.28 27.15 2.18 7.91 39.48 34.22 20.32 37.46 18.52 20.02 50.56	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73 1.00 1.68 2.00 0.81 0.89 1.75 0.30 1.16 1.20 3.19 4.61 7.95 5.54 2.96 5.49 2.47	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a 2.47 1.18b 2.01ab 2.44a 1.72ab 2.43ab 2.19ab 1.77ab 1.98ab 1.96 3.85b 7.30ab 8.57a 7.40ab 7.20ab 5.47ab	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99 3.20 1.36 2.34 2.87 2.63 3.96 2.63 3.23 2.80 2.73 4.51 9.98 9.18 9.26 11.25 8.90 8.47	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.14 0.00 2.06 0.00 0.75 1.20 1.64 0.68 0.00 0.79 0.00 2.10 4.96 3.71 2.46	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab 2.38 10.07a 4.72a 8.27a 7.40a 8.58a 8.04a 8.26a 8.15a 7.94 32.55a 17.75a 27.63a 25.44a 29.59a 26.79a 27.84a	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62 23.43 7.38 18.82 14.06 15.97 14.44 17.22 15.89 77.11 27.87 64.63 48.79 54.23 49.87 53.22
2 3 4 5 6 7 8 Mean 1 2 3 4 5 6 7 8 Mean	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	0.59 1.15 0.88 2.00 2.08 2.05 1.41 1.60 1.72 1.76 4.41 5.92 0.61 0.58 0.00 17.16 4.02 9.16 20.63 12.52 22.70 13.52 5.62	1.76cde 1.34e 1.55de 4.64a 2.67abcd 2.98abc 2.08bcde 2.54 9.53a 27.64a 36.09a 31.86a 7.15a 13.87a 14.50a 31.95a 21.57 40.07a 68.37a 82.75a 75.56a 34.58a 49.24a 47.85a 90.00a	2.94 1.53 2.22 7.28 3.26 3.91 2.76 3.47 17.34 53.51 67.76 57.80 14.92 27.16 31.34 81.07 43.86 70.97 116.11 152.97 128.42 55.65 92.86 95.05 219.97	1.70 1.39 1.61 1.65 1.65 1.99 1.74 1.50 2.94 0.00 1.76 0.00 2.59 6.10 6.72 2.70 5.82 9.74 0.50 6.99 0.00 10.31 18.96 20.80	1.88ab 1.97ab 2.16ab 2.54a 2.24ab 2.28ab 1.80b 2.17 5.02a 9.26a 7.99a 7.39a 6.07a 6.25a 9.25a 13.88a 8.14 17.59a 26.38a 22.70a 22.21a 20.09a 19.66a 29.20a 38.54a	2.06 2.55 2.71 3.43 2.83 2.57 2.02 2.61 8.54 15.58 16.10 13.03 14.50 9.91 12.41 21.03 13.89 29.36 43.02 44.90 37.43 45.31 29.02 39.45 56.27	2.19 2.12 1.93 2.04 1.68 2.20 2.16 2.59 2.11 2.90 2.79 1.31 2.41 2.27 2.22 2.37 1.73 2.25 10.09 6.34 9.74 8.16 9.22 9.63 7.21	2.54a 2.37a 2.25a 2.42a 2.38a 2.67a 2.61a 2.79a 2.50 10.83a 4.46a 9.87a 7.24a 8.97a 5.67a 8.14a 9.79a 8.12 (C 38.52a 14.93a 31.32a 24.08a 29.71a 20.38a 28.94a	2.88 2.62 2.58 2.80 3.08 3.13 3.06 3.00 2.89 Mg ^{2+/} 18.76 6.14 18.43 12.08 15.67 9.11 13.92 17.85 13.99 a ²⁺ +Mg 66.81 19.78 56.30 38.43 51.26 31.53 48.25 66.27	1.59 1.76 2.11 3.66 2.12 1.83 0.72 4.89 2.34 K ⁺ 0.53 1.77 3.20 0.83 2.10 2.39 0.00 2.05 1.60 2.2 ²⁺)/K ⁺ 0.85 3.77 15.79 3.60 13.75 16.30 4.50 12.51	3.20a 3.17a 4.67a 3.78a 3.97a 3.22a 5.84a 4.17 2.79ab 4.28ab 4.41a 3.57ab 3.50ab 3.83a 9.59ab 2.11b 4.26 20.16a 18.99a 18.06a 20.53a 16.14a 18.16a 27.53a 14.45a	4.65 4.23 5.69 5.45 6.10 5.71 6.79 6.01 5.05 6.79 5.63 6.31 4.90 5.28 27.15 2.18 7.91 39.48 34.22 20.32 37.46 18.52 20.02 50.56 16.40	1.71 1.90 2.35 1.21 1.52 1.41 1.57 1.73 1.00 1.68 2.00 0.81 0.89 1.75 0.30 1.16 1.20 3.19 4.61 7.95 5.54 2.96 5.49 2.47 5.39	2.61a 2.55a 3.46a 1.99a 2.31a 2.26a 2.28a 2.47 1.18b 2.01ab 2.44a 1.72ab 2.43ab 2.19ab 1.77ab 1.98ab 1.96 3.85b 7.30ab 8.57a 7.40ab 7.20ab 5.47ab	3.52 3.20 4.58 2.77 3.10 3.10 2.99 3.20 1.36 2.34 2.87 2.63 3.96 2.73 4.51 9.98 9.18 9.26 11.25 8.90 8.47 7.28	2.48 1.78 2.27 2.26 2.01 2.28 2.08 2.14 0.00 0.75 1.20 1.64 0.68 0.00 0.79 0.00 7.64 0.00 2.10 4.96 3.71 2.46 0.00	2.77a 2.19b 2.43ab 2.48ab 2.28b 2.37ab 2.35ab 2.38 10.07a 4.72a 8.27a 7.40a 8.58a 8.04a 8.26a 8.15a 7.94 32.55a 17.75a 27.63a 29.59a 26.79a 27.84a 27.14a	3.06 2.60 2.59 2.69 2.55 2.47 2.63 2.62 23.43 7.38 18.82 14.06 15.97 14.44 17.22 15.89 77.11 27.87 64.63 48.79 54.23 49.87 53.22 56.32

434

407 Percebe-se que os estoques de C e nutrientes apresentaram variações em função 408 das paisagens avaliadas, como mostra a Figura 2. Desta forma, o estoque de C foi maior 409 para a paisagem de palma forrageira (OEM-A) que apresentou variações 43,21 a 84,33 Mg ha⁻¹, com valor médio de 58,9 Mg ha⁻¹ (p<0,05) (Figura 2A). Em contrapartida, CAA, 410 411 DEFA e OEM-S obtiveram os menores estoques, com média de 28,58 Mg ha⁻¹ para CAA. 23,74 Mg ha⁻¹ para DEFA e 23,25 Mg ha⁻¹ para OEM-S, com valores mínimos e máximos 412 de 17,57 a 48,93 Mg ha⁻¹, 16,54 a 32,85 Mg ha⁻¹ e 18,06 a 37,13 Mg ha⁻¹, respectivamente 413 414 (p<0,05). Por sua vez, REGE e IPA-A apresentaram variações de 28,42 a 45,97 Mg ha⁻¹ e 43,21 a 84,33 Mg ha⁻¹, respectivamente, com valores médios de 36,27 Mg ha⁻¹ para 415 416 REGE e 46,24 Mg ha⁻¹ para IPA-A (Figura 2A) (p<0,05). Similarmente, o estoque de P 417 foi significativamente maior em OEM-A quando comparado as demais paisagens, com variações de 0,17 a 1,24 Mg ha⁻¹ e valor médio de 0,4 Mg ha⁻¹ (Figura 1B) (p<0,05), 418 419 enquanto OEM-S, DEFA, CAA, IPA-A e REGE tiveram os menores estoques de P (p<0.05). As variações foram de 0.03 a 0.15 Mg ha⁻¹ para OEM-S, 0.03 a 0.27 Mg ha⁻¹ 420 421 para DEFA, 0,01 a 0,06 Mg ha⁻¹ para CAA, 0,04 a 0,10 Mg ha⁻¹ para IPA-A e 0,04 a 0,20 422 Mg ha⁻¹ para REGE. Diferentemente, os estoques de K⁺ foram significativamente maiores 423 na REGE, que obteve valor médio acumulado de 0,90 Mg ha⁻¹, no entanto, não houve 424 diferença estatística entre REGE, DEFA e OEM-A (p>0,05). Além disso, CAA, OEM-S 425 e IPA-A registraram os menores estoques de K⁺, com médias de 0,4 Mg ha⁻¹ para CAA e 426 DEFA, e 0.6 Mg ha⁻¹ para IPA-A (p<0.05) (Figura 2C), de modo que, os valores máximos e mínimos foram de 0,31 a 0,58, 0,44 a 0,89 e 0,42 a 0,88 Mg ha⁻¹, respectivamente. Os 427 428 estoques de Ca²⁺ foram estatisticamente maiores para CAA, REGE e OEM-A não havendo diferença entre essas paisagens, com médias de 6,5, 6,4 e 5,3 Mg ha⁻¹, 429 430 respectivamente (Figura 2D). Enquanto os menores estoques de Ca²⁺ foram observados na IPA-A, com variações de 1,06 a 1,57 Mg ha⁻¹, com média de 1,33 Mg ha⁻¹, seguida 431 por DEFA que apresentou média de 4,1 Mg ha⁻¹, com variações de 3,58 a 4,69 Mg ha⁻¹ 432 (Figura 2D). Contudo, os estoques de Ca²⁺ na OEM-S não diferiu da DEFA e IPA-A. 433

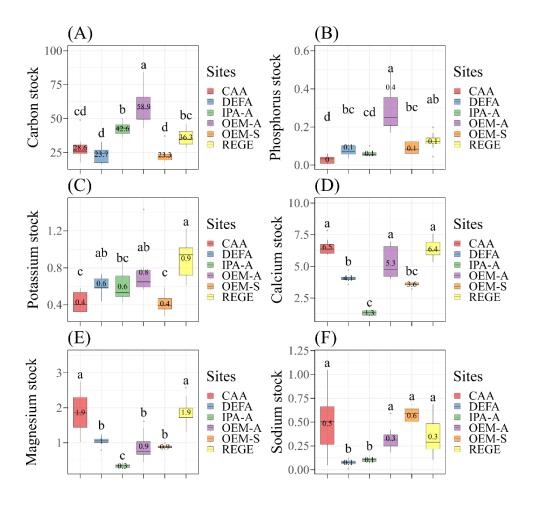


Figura 2. Estoques de carbono (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D), magnésio (E) e sódio (F) para os diferentes tipos de paisagens: Caatinga preservada (CAA), Caatinga desmatada (DEFA), área com palma forrageira clone IPA-Sertânia – Agreste (IPA-A), Orelha de Elefante Mexicana – Agreste (OEM-A), Orelha de Elefante Mexicana – Sertão (OEM-S) e Caatinga em regeneração (REGE).

Os estoques de Mg^{2+} foram maiores para as paisagens de Caatinga (i.e., REGE e CAA) que apresentaram média de 1,9 Mg ha⁻¹ cada, com variações de 1,02 a 2,75 Mg ha⁻¹ e 1,31 a 2,75 Mg ha⁻¹ (p<0,05) (Figura 2E). De modo contrastante, o menor estoque de Mg^{2+} foi observado na paisagem de palma (IPA-A) com redução de 47% em relação a CAA e REGE, com 1,0 Mg ha⁻¹ (p<0,05), enquanto DEFA, OEM-A e OEM-S foram estatisticamente iguais (p>0,05). De modo similar ao Mg^{2+} , o estoque de Na^+ foi maior na CAA, OEM-S, OEM-A e REGE, as quais não diferiram entre si, com médias de 0,5, 0,6, 0,3 e 0,3 Mg ha⁻¹, respectivamente (p<0,05) (Figura 2F). Por outro lado, DEFA e IPA-A obtiveram o menor estoque de Na^+ , com variações de 0,01 a 0,13 e 0,06 a 0,16 Mg ha⁻¹, respectivamente (p<0,05).

453 A mudança no uso e cobertura da terra afetou a distribuição vertical dos estoques 454 de C e nutrientes ao longo do perfil do solo (Figura 3). Assim, o estoque de C apresentou 455 variações de 4.41 a 8.23 Mg ha⁻¹ na DEFA, 5.72 a 9.91 Mg ha⁻¹ na CAA, 8.35 a 13.67 ha⁻¹ ¹ na IPA-A, 13,70 a 15,96 Mg ha⁻¹ na OEM-A, 4,63 a 7,37 Mg ha⁻¹ na OEM-S e 5,51 a 456 457 11,66 Mg ha⁻¹ na REGE, de modo que as menores concentrações foram observadas nas 458 camadas mais profundas (30-40 cm) em todas as paisagens. Além disso, as paisagens com 459 palma forrageira, i.e., OEM-A e IPA-A, em todo o perfil do solo (0-40 cm) obtiveram os maiores estoques de C, com médias de 14,72 e 10,66 Mg ha⁻¹, respectivamente, seguida 460 por REGE (9,07 Mg ha⁻¹), CAA (7,15 Mg ha⁻¹), DEFA (5,94 Mg ha⁻¹) e OEM-S (5,81 461 Mg ha⁻¹) (Figura 3A). O estoque de P exibiu comportamento similar ao estoque de C 462 (Figura 3D). Na OEM-A, a média foi de 0,08 Mg ha⁻¹ e o estoque de P variou de 0,06 a 463 0,09 Mg ha⁻¹, enquanto nas demais paisagens foram observadas variações de 0,02 a 0,05 464 Mg ha⁻¹, com média de 0,03 Mg ha⁻¹ para REGE. Já na OEM-S observou-se uma média 465 de 0,02 Mg ha⁻¹, com variações de 0,02 a 0,03 Mg ha⁻¹. Da mesma forma, DEFA obteve 466 467 valor médio de 0,02 Mg ha⁻¹ variando de 0,01 a 0,04 Mg ha⁻¹, enquanto CAA e IPA-A tiveram os menores estoques de P, com média de 0,01 e 0,02 Mg ha⁻¹, respectivamente. 468 Em contrapartida, o estoque de K+ foi maior para REGE, em todas as profundidades 469 470 quando comparada as demais, assumindo valores médios de 0,23 Mg ha⁻¹ (Figura 3C). Além disso, OEM-A mostrou um acréscimo de 52% no estoque de K⁺ na profundidade 471 472 de 20-30 cm em relação a camada de 0-10, com média de 0,19 Mg ha⁻¹ e variações de 0,16 a 0,26 Mg ha⁻¹, enquanto na IPA-A as variações foram de 0,12 a 0,18 Mg ha⁻¹ e 473 média de 0,15 Mg ha⁻¹. Na DEFA os estoques de K⁺ variaram de 0,07 a 0,28 Mg ha⁻¹, 474 475 com média de 0,16 Mg ha⁻¹, com reduções ao longo do perfil (Figura 3B). As paisagens 476 de CAA e OEM-S resultaram em estoques médio de K+ de 0,11 e 0,15 Mg ha-1, respectivamente, com variações de 0,09 a 0,13 Mg ha⁻¹ para CAA e 0,12 a 0,18 Mg ha⁻¹ 477 478 para OEM-S. Por sua vez, as paisagens de Caatinga (i.e., CAA e REGE) registraram os maiores estoques de Ca²⁺ com média de 1,64 e 1,59 Mg ha⁻¹, respectivamente, os quais 479 variaram de 1,43 a 1,82 Mg ha⁻¹ na CAA e 1,48 a 1,83 Mg ha⁻¹ na REGE (Figura 2E). Por 480 outro lado, IPA-A apresentou variações de 0,28 a 0,37 Mg ha⁻¹, sendo a paisagem com 481 menor estoque de Ca²⁺ (0,33 Mg ha⁻¹), enquanto na DEFA e OEM-S a média do estoque 482 foi semelhante, com 0,90 e 1,02 Mg ha⁻¹, respectivamente. No entanto, com exceção de 483 IPA-A, em todas as paisagens o estoque de Ca²⁺ apresentou aumentos ao longo do perfil 484 do solo, com acréscimos de 11%, 62%, 4% e 55% da camada de 10 cm para a de 40 cm 485

na CAA, OEM-S, OEM-A, DEFA, respectivamente, enquanto na REGE o acréscimo foi de 23% da camada de 10 cm para a de 30 cm. Da mesma forma, o estoque de Mg²⁺ apresentou aumentos ao longo do perfil do solo, especialmente na CAA e REGE que obtiveram maior média (0,47 Mg ha⁻¹). Esses aumentos foram de 73% para a CAA, 21% para REGE, 86% para OEM-S, 78% para OEM-A e 48% para DEFA da camada de 10 cm para a de 40 cm. No entanto, na IPA-A os valores de Mg²⁺ permaneceram semelhantes entre as camadas.

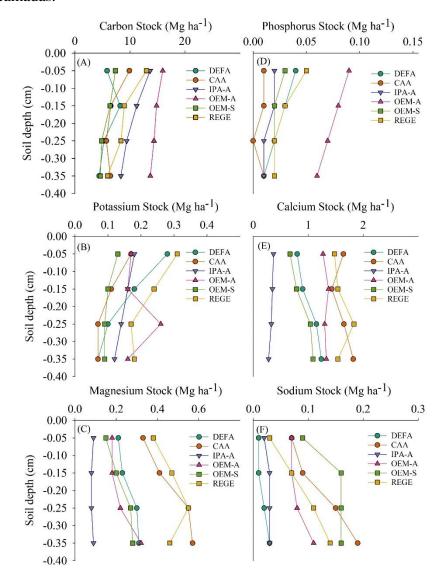


Figura 3. Distribuição vertical dos estoques de carbono (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D), magnésio (E) e sódio (F) para os diferentes tipos de paisagem: Caatinga preservada (CAA), Caatinga desmatada (DEFA), área com palma forrageira clone IPA-Sertânia – Agreste (IPA-A), Orelha de Elefante Mexicana – Agreste (OEM-A), Orelha de Elefante Mexicana – Sertão (OEM-S) e Caatinga em regeneração (REGE).

O estoque de Na⁺, por sua vez, seguiu o mesmo comportamento dos demais nutrientes, aumentando ao longo do perfil do solo (Figura 3F). Assim, maiores quantidades de Na⁺ foram observados, principalmente, para as paisagens do Sertão, a exemplo de OEM-S, CAA e REGE que obtiveram estoque médio de 0,14, 0,12 e 0,09 Mg ha⁻¹, respectivamente, enquanto DEFA foi responsável pelo menor estoque (0,02 Mg ha⁻¹). Já as paisagens do Agreste (i.e., OEM-A e IPA-A) apresentaram estoques de 0,08 e 0,03 Mg ha⁻¹. Na CAA houve um acréscimo de 171% na quantidade de Na⁺, 366% na REGE, 78% na OEM-S, 57% na OEM-A, 50% na IPA-A e 200% na DEFA.

4. DISCUSSÃO

510 4.1. Estoques de C e P são maiores em paisagens de palma forrageira (Opuntia stricta 511 Haw.)

No presente estudo, os estoques de C, P, K⁺ e Mg²⁺, Ca²⁺ e Na⁺ foram significativamente afetados pelo tipo de uso da terra, os quais apresentaram variações ao longo das paisagens, profundidades e épocas do ano. Os estoques de C e P foram os mais elevados na OEM-A. A variação dos estoques ao longo das paisagens e das profundidades, podem ser associadas a disponibilidade de matéria orgânica adicionada.

A quantidade de C e nutrientes disponíveis no solo podem variar de acordo com o tipo de cobertura vegetal, solo, biomassa radicular e a intensidade das intervenções antrópicas (Zhou et al., 2023). A entrada de C no solo nos ecossistemas é controlado, principalmente, a partir da deposição e decomposição da serapilheira, além da biomassa radicular, exsudados radiculares e posterior saída por meio da respiração heterotrófica (Benbi et al., 2012). Assim, neste estudo, os estoques de C no solo foram significativamente maiores nos ecossistemas de palma situados no Agreste pernambucano (i.e., OEM-A e IPA-A), quando comparados a áreas com vegetação nativa (i.e., CAA) e não apresentaram diferença no armazenamento de C em relação à REGE, embora estejam situados em regiões diferentes (Figura 2). Além disso, percebe-se que para as paisagens situadas no Sertão (i.e., CAA, REGE, DEFA e OEM-S) a capacidade de estocar C é semelhante.

Tais resultados podem ser atribuídos ao manejo de solo adotado, a exemplo da adubação orgânica com esterco para OEM-A, resultando em maior quantidade de carbono estocado no solo, além das características do solo e do clima, uma vez que em condições de déficit hídrico a produção de biomassa e sua incorporação no solo torna-se limitada (Santana et al., 2022). Associado a isto, a vegetação perene possui maior quantidade de

resíduos no solo, a exemplo da perda de cladódios, restos de tratos culturais, o que implica no maior reservatório de C no solo (C. Li et al., 2016). Na verdade, os estoques de C variam em detrimento dos diferentes tipos de uso da terra, de tal forma que as mudanças que ocorrem tendem a ser complexas em função dos diferentes tipos de decomposição que ocorrem no solo (Bakhshandeh et al., 2019).

O estoque de C na OEM-A quando comparado as áreas de vegetação nativa (i.e., CAA e REGE), mostrou aumentos de 150% e 114%, respectivamente. Ecossistemas de florestas secas, a exemplo da Caatinga, apresentam alta variabilidade nos estoques de C no solo em função das condições ambientais como tipo de solo, densidade da vegetação e fatores climáticos, especialmente, a precipitação (Menezes et al., 2021). Em nosso estudo, os estoques de C na CAA foram de 25,08 Mg ha⁻¹, enquanto a OEM-A obteve um estoque médio de 58,86 Mg ha⁻¹. Coêlho et al. (2023) evidenciaram que a palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana nas camadas de 0-20 cm é capaz de armazenar cerca de 100 Mg C ha⁻¹, evidenciando a capacidade desta cultura em mitigar as mudanças climáticas, a partir do armazenamento de C em ambientes semiáridos. O solo presente na vegetação de Caatinga, que inclui as paisagens de CAA, REGE, DEFA e OEM-S é classificado como arenoso, sendo caracterizado pelos baixos teores de C (Schulz et al., 2016).

Embora situadas em regiões diferentes, percebe-se que o estoque de P foi semelhante entre as paisagens de OEM-A, OEM-S e REGE. O conteúdo de P presente no solo é um indicativo do impacto das atividades antrópicas no ambiente, de modo que, a intensificação de atividades como a agricultura, pastoreio e aplicação de fertilizantes naturais, a exemplo do estrume potencializam o acúmulo deste nutriente no solo, contudo, o P é um elemento com baixa mobilidade no solo (Kabala et al., 2018; Wang et al., 2022). Em contrapartida, os acúmulos de P na OEM-A mostraram aumento de 85% quando comparado a CAA. No entanto, deve-se considerar a paisagem de OEM-A foi submetida a adição de adubação orgânica, e associado a isso, os estoques de P podem variam de acordo com o tipo de cobertura vegetal uma vez que haverá diferença nas características da serapilheira, clima, solo e manejos diferentes (Cherubin et al., 2016; Wright, 2009)

A conversão de florestas naturais para diferentes tipos de uso da terra pode proporcionar reduções nos estoques de K⁺ no solo. Desta forma, a paisagem com maior estoque de K⁺ foi a REGE (Figura 2C) (Bakhshandeh et al., 2019). Os estoques de K⁺ no sistema solo-planta estão associadas ao intemperismo, decomposição dos restos vegetais e adição de fertilizantes (Santana et al., 2022). O aumento das concentrações de K⁺ no solo e, consequentemente, dos estoques pode ser atribuído a menor quantidade de argila.

Outro fator importante, é que após o desmatamento parcial da vegetação ocorreu a queima da vegetação na REGE, o que pode ter favorecido ao aumento das bases trocáveis (Mg²+, Ca²+, K+ e Na+) devido a incorporação das cinzas, que são ricas em nutrientes (Bakhshandeh et al., 2019; Mishra & Francaviglia, 2021). Sazonalmente, observa-se que as concentrações e estoques de K+ foram maiores durante a estação chuvosa e a transição seco-chuvosa. Durante as estações em que a disponibilidade de água no solo é maior, a matéria orgânica proveniente da serapilheira passa pelo processo de mineralização disponibilizando os nutrientes no solo, a exemplo do K+ (Kaur et al., 2021). Além disso, o estoque de K+ reduziu com o aumento da profundidade do solo. Neste sentido, os maiores estoques de Mg²+, Ca²+ e Na+ foram observados na REGE, de modo que, as áreas de CAA, OEM-A e OEM-S armazenaram estes nutrientes de forma semelhante à REGE. Mishra e Francavigilia (2021) avaliando diferentes tipos de uso da terra, constataram maiores teores de K+ em áreas de cultivos itinerantes em função das cinzas deixadas após a queima da vegetação nativa.

As concentrações de Mg²⁺ aumentaram ao longo do perfil do solo. Assim, tanto as concentrações como os estoques de Mg²⁺ foram maiores para as paisagem de vegetação nativa (i.e., CAA e REGE) quando compara as paisagens cultivadas (i.e., OEM-S e IPA-A). Este fenômeno pode ser atribuído as características da vegetação, visto que, a copa das árvores promovem condições favoráveis para o intemperismo mineral, a partir das condições ideias de temperatura e umidade, culminando em uma maior liberação de Mg²⁺. Neste sentindo, Samani et al. (2020) relataram que as copas das árvores são responsáveis pela adição de 27 kg Mg²⁺ ha⁻¹ ano⁻¹. Logo, a ausência de vegetação arbórea e serapilheira em áreas cultivadas, reduz a quantidade de Mg²⁺ que retorna ao solo (Samani et al., 2020). Santana et al. (2022) e Samani et al. (2020) observaram reduções nas concentrações de Mg²⁺ em campos agrícolas, devido à baixa deposição de resíduos orgânicos e remoção da biomassa aérea.

4.2. Estoques de C e nutrientes diminuem ao longo do perfil do solo

Neste estudo, o conteúdo de nutrientes e C diminuiu com o aumento da profundidade. Resultados semelhantes foram encontrado em outros estudos (Danise et al., 2022; Santana et al., 2022; Zhao et al., 2022). As concentrações e os estoques de C, P e K⁺ diminuíram com o aumento da profundidade do solo. Assim, além da mudança no uso da terra, a profundidade do solo são fatores que influenciam na distribuição de nutrientes ao longo do perfil do solo (C. Li et al., 2016). As maiores concentrações e estoques de C na

superfície do solo (0-10 cm) estão associados a entrada de matéria orgânica e nutrientes via deposição da serapilheira, além dos sistemas radiculares abundantes, extensos e a produção de exsudados pela vegetação. Isso pode contribuir para maiores concentrações de C nas camadas mais superficiais do solo (Freitas et al., 2022; Kaur et al., 2021). Li et al. (2016) observaram maiores concentrações de C, N e P na camada superficial do solo (0-10 cm), com reduções nas profundidades de 10-40 cm, corroborando com os resultados encontrados no presente estudo. Resultados semelhantes também foram reportados por Freitas et al. (2022) em vegetação nativa de Caatinga.

Assim, as concentrações e o estoques de P foram relativamente homogêneos em todas as camadas, com exceção da IPA-A que apresentou reduções de 60% da camada de 10 cm para a de 40 cm. Embora a mobilidade do P seja limitada com maiores acúmulos na camada superficial, com exceção da IPA-A, que os estoques tiveram uma distribuição homogênea entre as camadas do solo (Alves et al., 2019; Gava et al., 2022). Contudo, o acúmulo de P nas camadas superiores pode ser atribuído ao uso de adubação ou pela ciclagem dos resíduos orgânicos depositados no solo (Assis et al., 2010). Os mesmos autores também relataram reduções no conteúdo de P com o aumento da profundidade.

A redução das concentrações dos macronutrientes P e K⁺ pode estar associado à variabilidade das atividades microbianas e fúngicas, uma vez que estas reduzem com o aumento da profundidade do solo. Outro fator a se considerar é que nas camadas mais profundas do solo, os nutrientes provenientes da decomposição da serapilheira são limitados, logo, as maiores concentrações e estoques destes nutrientes se restringem as camadas mais superficiais do solo (Baul et al., 2023; Zhao et al., 2022). Além disso, maiores concentrações de K⁺ e P nas camadas mais superficiais do solo pode ser atribuída ao papel de ciclagem de nutrientes que a vegetação exerce sobre estes elementos, visto que, a partir da queda de resíduos orgânico estes nutrientes são rapidamente absorvidos conforme aumento da necessidade da vegetação (Teramage et al., 2023).

Em contrapartida, as bases trocáveis (i.e., Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺) aumentaram ao longo do perfil do solo, e consequentemente, a soma de bases (SB), Ca²⁺/K⁺, Ca²⁺/Mg²⁺, Mg²⁺/K⁺ e (Ca²⁺Mg²⁺)/K⁺, independente da paisagem. O aumento das bases trocáveis são indicativos de que os nutrientes que foram liberados permaneceram nas camadas de 40 cm, principalmente, na REGE, já que esta paisagem passou pelo processo de queima de biomassa após o desmatamento parcial da área (Bahr et al., 2014). Além disso, as maiores concentrações de Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺ podem ser devido a maior quantidade de serapilheira em decomposição lenta nas camadas mais superficiais do solo, a qual libera cátions que

a partir do processo de lixiviação se acumulam nas camadas mais profundas (Arunrat et al., 2022). Os mesmos autores observaram a maiores concentrações de K⁺, Mg²⁺ e Ca²⁺ no subsolo em florestas naturais. Por outro lado, Santana et al. (2022) constataram maiores concentrações de Ca²⁺ e Mg²⁺ nas camadas superficiais de 0-20 cm em sistemas agrícolas, comportamento contrário ao observado neste estudo.

4.3. Padrões sazonais na dinâmica de C e nutrientes no solo

Os estoques de C e nutrientes apresentaram variações sazonais, com maiores concentrações na estação chuvosa e na transição chuvosa-seca. Assim, a sazonalidade da deposição de serapilheira e consequentemente, dos nutrientes que serão liberados no solo são dependentes dos eventos de chuva (Tomar & Baishya, 2020). Além disso, os maiores estoques de C foram observados para CAA, REGE, OEM-S, OEM-A e DEFA (p<0,05). O aumento observado pode ser associado, principalmente, a camada de serapilheira que é depositada no solo durante a estação seca, a qual é fonte essencial para a transferência de nutrientes da vegetação para o solo através da decomposição deste material (Sales et al., 2020). Assim, o aumento da umidade no solo, em função dos eventos de chuva, contribui para o aumento da atividade microbiana sobre a decomposição da serapilheira presente no solo, além de ser o principal fator para a mineralização dos compostos orgânicos presente no solo (Tomar & Baishya, 2020b). Por isso, maiores quantidades de carbono são degradados pela ação dos microrganismos que estão presentes no solo, resultando em maiores concentrações de C no solo (Baradwal et al., 2023; Khan & Chiti, 2022).

Em contrapartida, os menores estoques são observados durante a transição secochuvosa. Em regiões semiáridas, devido a ocorrência de déficit hídrico em maior parte do ano, ocorre a perda de folhas pela vegetação durante a estação seca (Gava et al., 2021). Assim, o material decíduo se acumula acima do solo e será decomposto em função do aumento da disponibilidade de água a partir dos eventos de chuva. Por isso, durante a estação de transição seco-chuvosa há menor retorno de nutrientes para o solo (Gava et al., 2022).

Os estoques de P e K⁺ apresentaram comportamento semelhante aos estoques de C, com aumentos durante a estação chuvosa e as transições seca-chuvosa e chuvosa-seca. Os maiores conteúdos de P e K⁺ podem ser associados ao fornecimento de matéria orgânica devido à deposição da serapilheira, que por sua vez, passa pelo processo de mineralização dos nutrientes (Kaur et al., 2021). Além disso, a dinâmica sazonal dos

nutrientes no solo fornecidos via serapilheira são dependentes da fisiologia da vegetação presente, visto que o P tem uma taxa de reabsorção maior pelas plantas em relação a outros nutrientes, com menores concentrações durante o período chuvoso em OEM-A e DEFA (Quichimbo et al., 2020). Diferentemente, os estoque de K⁺ na OEM-S foi menor durante a estação chuvosa. Esta diminuição indica que o K⁺ do solo provavelmente foi extraído pela planta, visto que o K⁺ é um dos nutrientes mais extraídos pela palma forrageira (Jardim et al., 2023). Além disso, durante o período chuvoso os nutrientes, assim como o K⁺, tornam-se mais disponíveis para as plantas (Camelo et al., 2021; Matos et al., 2021).

Além disso, os menores estoques de Mg²⁺ e Na⁺ foram observados durante a estação chuvosa na REGE. A diminuição da disponibilidade destes nutrientes no solo durante a estação chuvosa pode ser associado a absorção destes pela vegetação ou ainda, que eles estão sendo lixiviados. Assim, percebe-se que a sazonalidade dos eventos de chuva é um fator importante, que influencia na dinâmica de nutrientes no solo, tornando-os mais disponíveis no solo como foi observado por Kaur et al. (2021) que constataram aumentos nos macro e micronutrientes avaliados, ou lixiviando-os. Portanto, ambientes caracterizados com clima quente, a exemplo do semiárido brasileiro, durante a estação chuvosa, apresentam maior taxa de decomposição da matéria orgânica presente no solo a partir do aumento da atividade microbiana que registra maior pico durante o período de maior disponibilidade de água no solo e consequentemente, ocorre a maior liberação de nutrientes no solo (Lepcha & Devi, 2020).

5. CONCLUSÕES

O presente estudo buscou investigar os estoques de C e nutrientes no solo e a dinâmica destes nutrientes ao longo da profundidade e em função da sazonalidade dos eventos de chuva, a fim de compreender quais as implicações da mudança no uso da terra sobre estes nutrientes. Assim, observamos que os estoques diminuem com o aumento da profundidade do solo, com menores valores nas profundidades de 40 cm, com exceção das bases trocáveis (Ca²⁺, Na⁺ e Mg²⁺) que aumentaram ao longo do perfil do solo. Além disso, a sazonalidade foi um fator importante, contribuindo para maiores acúmulos de C e nutrientes durante os períodos com maior disponibilidade de água no ambiente. Outro fator importante na dinâmica de nutrientes no solo, foi a utilização de adubação orgânica com esterco em uma área com clones de palma forrageira 'Orelha de Elefante Mexicana' no Agreste pernambucano, a qual foi capaz de armazenar 58,9 Mg C ha⁻¹ e 0,4 Mg P ha⁻¹

703 ¹, enquanto ambientes com vegetação nativa de Caatinga preservada armazenaram 25,1 704 Mg C ha⁻¹. Assim, torna-se evidente a capacidade de plantas de palma forrageira em 705 acumular carbono no solo e mitigar as mudanças climáticas em ecossistemas semiáridos. 706 Além disso, a remoção da vegetação nativa e posterior queima promoveu maior estoque 707 de K⁺ na área de Caatinga em regeneração, a qual foi capaz de armazenar 0,9 Mg K⁺ ha⁻ 708 ¹. Os estoques de K⁺ na Caatinga em regeneração foram 56% maior em relação a Caatinga 709 preservada, totalizando 0,5 Mg ha⁻¹ a mais de K⁺. A conversão da Caatinga em áreas 710 desmatadas, e com clones de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana no Sertão e IPA-Sertânia no Agreste reduziram os estoques de Ca²⁺, enquanto as paisagens de 711 Caatinga preservada, Caatinga em regeneração e o clone de Orelha de Elefante Mexicana 712 no Agreste armazenam Ca²⁺ de forma semelhante. Os estoques de Mg²⁺ foram maiores 713 nas paisagens de Caatinga (i.e., CAA e REGE), enquanto nas demais paisagens a 714 715 capacidade de armazenar foi reduzida. Além disso, áreas de Caatinga preservada, em 716 regeneração e com clones de Orelha de Elefante Mexicana no Agreste e no Sertão 717 estocam Na⁺ de forma semelhante, com reduções na capacidade de armazenamento para 718 áreas desmatadas e com clone de IPA Sertânia no Agreste. Portanto, este estudo 719 evidenciou as alterações que a mudança no uso da terra promove na dinâmica de C e 720 nutrientes no solo, de modo que, clones de palma forrageira podem ser utilizados para 721 combater a desertificação em ambientes degradados, perda de biodiversidade e avanço 722 das mudanças climáticas, além de poder ser utilizada de forma estratégica para 723 erradicação da pobreza.

724725

6. REFERÊNCIAS

- Althoff, T. D., Menezes, R. S. C., Pinto, A. de S., Pareyn, F. G. C., Carvalho, A. L. de,
- Martins, J. C. R., de Carvalho, E. X., Silva, A. S. A. da, Dutra, E. D., & Sampaio,
- E. V. de S. B. (2018). Adaptation of the century model to simulate C and N
- dynamics of Caatinga dry forest before and after deforestation. *Agriculture*,
- 730 *Ecosystems & Environment*, 254, 26–34.
- 731 https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2017.11.016
- Alves, L. A., Denardin, L. G. de O., Martins, A. P., Anghinoni, I., Carvalho, P. C. de F.,
- 8 Tiecher, T. (2019). Soil acidification and P, K, Ca and Mg budget as affected by
- sheep grazing and crop rotation in a long-term integrated crop-livestock system in
- 735 southern Brazil. *Geoderma*, *351*, 197–208.
- 736 https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2019.04.036

- Arunrat, N., Sereenonchai, S., Kongsurakan, P., & Hatano, R. (2022). Soil organic
- carbon and soil erodibility response to various land-use changes in northern
- 739 Thailand. *CATENA*, 219, 106595. https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2022.106595
- 740 Assis, C. P. de, de Oliveira, T. S., da Nóbrega Dantas, J. d. A., & de Sá Mendonça, E.
- 741 (2010). Organic matter and phosphorus fractions in irrigated agroecosystems in a
- semi-arid region of Northeastern Brazil. Agriculture, Ecosystems & Environment,
- 743 *138*(1–2), 74–82. https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2010.04.002
- Bahr, E., Chamba Zaragocin, D., & Makeschin, F. (2014). Soil nutrient stock dynamics
- and land-use management of annuals, perennials and pastures after slash-and-burn
- in the Southern Ecuadorian Andes. Agriculture, Ecosystems & Environment, 188,
- 747 275–288. https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2014.03.005
- Bakhshandeh, E., Hossieni, M., Zeraatpisheh, M., & Francaviglia, R. (2019). Land use
- change effects on soil quality and biological fertility: A case study in northern Iran.
- 750 European Journal of Soil Biology, 95, 103119.
- 751 https://doi.org/10.1016/J.EJSOBI.2019.103119
- 752 Baradwal, H., Ghosh, A., Singh, A. K., Jiménez-Ballesta, R., Yadav, R. K., Misra, S.,
- 753 Siddanagouda Sannagoudar, M., Kumar, S., Kumar, R. V., Singh, S. K., Yadav, D.
- 754 K., & Mahala, D. M. (2023). Soil Nutrient Dynamics under Silviculture,
- 755 Silvipasture and Hortipasture as Alternate Land-Use Systems in Semi-Arid
- 756 Environment. Forests 2023, Vol. 14, Page 125, 14(1), 125.
- 757 https://doi.org/10.3390/F14010125
- 758 Baul, T. K., Chowdhury, A. I., Uddin, M. J., Hasan, M. K., Kilpeläinen, A., Nandi, R.,
- Karmakar, S., & Akhter, J. (2023). Effects of fragmentation and shifting
- cultivation on soil carbon and nutrients: A case study in Sitapahar forest,
- 761 Bangladesh. *Rhizosphere*, 27, 100756.
- 762 https://doi.org/10.1016/J.RHISPH.2023.100756
- 763 Benbi, D. K., Brar, K., Toor, A. S., Singh, P., & Singh, H. (2012). Soil carbon pools
- under poplar-based agroforestry, rice-wheat, and maize-wheat cropping systems in
- semi-arid India. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 92(1), 107–118.
- 766 https://doi.org/10.1007/S10705-011-9475-8/FIGURES/5
- 767 Camelo, D., Dubeux, J. C. B., Dos Santos, M. V. F., Lira, M. A., Fracetto, G. G. M.,
- Fracetto, F. J. C., da Cunha, M. V., & de Freitas, E. V. (2021). Soil Microbial
- Activity and Biomass in Semiarid Agroforestry Systems Integrating Forage Cactus
- and Tree Legumes. *Agronomy 2021, Vol. 11, Page 1558, 11*(8), 1558.

- 771 https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11081558
- 772 Cherubin, M. R., Franco, A. L. C., Cerri, C. E. P., Karlen, D. L., Pavinato, P. S.,
- Rodrigues, M., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2016). Phosphorus pools responses
- to land-use change for sugarcane expansion in weathered Brazilian soils.
- 775 *Geoderma*, 265, 27–38. https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2015.11.017
- 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
- 779 the Brazilian Semiarid. *Agronomy 2023, Vol. 13, Page 743, 13*(3), 743.
- 780 https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13030743
- Danise, T., Innangi, M., Curcio, E., & Fioretto, A. (2022). Covariation between plant
- biodiversity and soil systems in a European beech forest and a black pine
- 783 plantation: the case of Mount Faito, (Campania, Southern Italy). *Journal of*
- 784 Forestry Research, 33(1), 239–252. https://doi.org/10.1007/S11676-021-01339-
- 785 3/TABLES/2
- Fernandes, M. M., Fernandes, M. R. de M., Garcia, J. R., Matricardi, E. A. T., de
- Almeida, A. Q., Pinto, A. S., Menezes, R. S. C., Silva, A. de J., & Lima, A. H. de
- 788 S. (2020). Assessment of land use and land cover changes and valuation of carbon
- stocks in the Sergipe semiarid region, Brazil: 1992–2030. Land Use Policy, 99,
- 790 104795. https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2020.104795
- 791 Ferreira, A. C. C., Leite, L. F. C., de Araújo, A. S. F., & Eisenhauer, N. (2016). Land-
- Use Type Effects on Soil Organic Carbon and Microbial Properties in a Semi-arid
- Region of Northeast Brazil. Land Degradation & Development, 27(2), 171–178.
- 794 https://doi.org/10.1002/LDR.2282
- 795 Freitas, I. C. de, Alves, M. A., Magalhães, J. R., Dias, R. F., Albuquerque, C. J. B.,
- Ferreira, E. A., Fernandes, L. A., Pegoraro, R. F., & Frazão, L. A. (2022). Soil
- Carbon and Nitrogen Stocks under Agrosilvopastoral Systems with Different
- Arrangements in a Transition Area between Cerrado and Caatinga Biomes in
- 799 Brazil. Agronomy 2022, Vol. 12, Page 2926, 12(12), 2926.
- 800 https://doi.org/10.3390/AGRONOMY12122926
- Gava, C. A. T., Giongo, V., Signor, D., Fernandes-Júnior, P. I., Correspondente, B., &
- Agricultural, B. (2022). Land-use change alters the stocks of carbon, nitrogen, and
- phosphorus in a Haplic Cambisol in the Brazilian semi-arid region. *Soil Use and*
- 804 *Management*, 38(1), 953–963. https://doi.org/10.1111/SUM.12716

- Jardim, A. M. da R. F., Araújo Júnior, G. D. N., da Silva, M. V., Dos Santos, A., da
- 806 Silva, J. L. B., Pandorfi, H., de Oliveira-Júnior, J. F., Teixeira, A. H. de C.,
- Teodoro, P. E., de Lima, J. L. M. P., da Silva Junior, C. A., de Souza, L. S. B.,
- Silva, E. A., & da Silva, T. G. F. (2022). Using Remote Sensing to Quantify the
- Joint Effects of Climate and Land Use/Land Cover Changes on the Caatinga
- Biome of Northeast Brazilian. *Remote Sensing*, 14(8), 1911.
- 811 https://doi.org/10.3390/RS14081911/S1
- 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
- 814 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*
- 817 *Hydrology*, 625, 130121. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2023.130121
- Johnson, D. W., & Turner, J. (2019). Tamm Review: Nutrient cycling in forests: A
- historical look and newer developments. Forest Ecology and Management, 444,
- 820 344–373. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2019.04.052
- Kabala, C., Galka, B., Labaz, B., Anjos, L., & de Souza Cavassani, R. (2018). Towards
- more simple and coherent chemical criteria in a classification of anthropogenic
- soils: A comparison of phosphorus tests for diagnostic horizons and properties.
- 824 *Geoderma*, 320, 1–11. https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2018.01.024
- 825 Kaur, T., Sehgal, S. K., Singh, S., Sharma, S., Dhaliwal, S. S., & Sharma, V. (2021).
- Assessment of Seasonal Variability in Soil Nutrients and Its Impact on Soil Quality
- under Different Land Use Systems of Lower Shiwalik Foothills of Himalaya,
- 828 India. Sustainability 2021, Vol. 13, Page 1398, 13(3), 1398.
- 829 https://doi.org/10.3390/SU13031398
- Khan, M. Z., & Chiti, T. (2022). Soil carbon stocks and dynamics of different land uses
- in Italy using the LUCAS soil database. *Journal of Environmental Management*,
- 832 306, 114452. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.114452
- Kong, X., Zhang, F., Wei, Q., Xu, Y., & Hui, J. (2006). Influence of land use change on
- soil nutrients in an intensive agricultural region of North China. Soil and Tillage
- 835 Research, 88(1–2), 85–94. https://doi.org/10.1016/J.STILL.2005.04.010
- Lai, L., Huang, X., Yang, H., Chuai, X., Zhang, M., Zhong, T., Chen, Z., Chen, Y.,
- Wang, X., & Thompson, J. R. (2016). Carbon emissions from land-use change and
- management in China between 1990 and 2010. Science Advances, 2(11).

- https://doi.org/10.1126/SCIADV.1601063/SUPPL_FILE/1601063_SM.PDF
- 840 Lepcha, N. T., & Devi, N. B. (2020). Effect of land use, season, and soil depth on soil
- microbial biomass carbon of Eastern Himalayas. *Ecological Processes*, 9(1), 1–14.
- 842 https://doi.org/10.1186/S13717-020-00269-Y/FIGURES/4
- 843 Li, C., Zhao, L., Sun, P., Zhao, F., Kang, D., Yang, G., Han, X., Feng, Y., & Ren, G.
- 844 (2016). Deep Soil C, N, and P Stocks and Stoichiometry in Response to Land Use
- Patterns in the Loess Hilly Region of China. *PLOS ONE*, 11(7), e0159075.
- 846 https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0159075
- 847 Li, H., Zhu, H., Qiu, L., Wei, X., Liu, B., & Shao, M. (2020). Response of soil OC, N
- and P to land-use change and erosion in the black soil region of the Northeast
- China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 302, 107081.
- https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2020.107081
- 851 Matos, L. V., Donato, S. L. R., Kondo, M. K., Lani, J. L., & Aspiazú, I. (2021). Soil
- attributes and the quality and yield of 'Gigante' cactus pear in agroecosystems of
- the semiarid region of Bahia. *Journal of Arid Environments*, 185, 104325.
- https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2020.104325
- Medeiros, E. V. de, Duda, G. P., Rodrigues dos Santos, L. A., de Sousa Lima, J. R.,
- Almeida-Cortêz, J. S. d., Hammecker, C., Lardy, L., & Cournac, L. (2017). Soil
- organic carbon, microbial biomass and enzyme activities responses to natural
- regeneration in a tropical dry region in Northeast Brazil. *CATENA*, 151, 137–146.
- https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2016.12.012
- Menezes, R. S. C., Sales, A. T., Primo, D. C., Albuquerque, E. R. G. M. de, Jesus, K. N.
- de, Pareyn, F. G. C., Santana, M. da S., Santos, U. J. dos, Martins, J. C. R., Althoff,
- T. D., Nascimento, D. M. do, Gouveia, R. F., Fernandes, M. M., Loureiro, D. C.,
- Araújo Filho, J. C. de, Giongo, V., Duda, G. P., Alves, B. J. R., Ivo, W. M. P. de
- M., ... Sampaio, E. V. de S. B. (2021). Soil and vegetation carbon stocks after
- land-use changes in a seasonally dry tropical forest. *Geoderma*, 390, 114943.
- 866 https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2021.114943
- Mishra, G., & Francaviglia, R. (2021). Land Uses, Altitude and Texture Effects on Soil
- Parameters. A Comparative Study in Two Districts of Nagaland, Northeast India.
- 869 Agriculture 2021, Vol. 11, Page 171, 11(2), 171.
- 870 https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE11020171
- Queiroz, M. G., da Silva, T. G. F., Zolnier, S., Jardim, A. M. da R. F., de Souza, C. A.
- 872 A., Araújo Júnior, G. do N., de Morais, 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
- Quichimbo, P., Jiménez, L., Veintimilla, D., Potthast, K., Tischer, A., Günter, S.,
- Mosandl, R., & Hamer, U. (2020). Nutrient dynamics in an Andean forest region: a
- case study of exotic and native species plantations in southern Ecuador. *New*
- 879 Forests, 51(2), 313–334. https://doi.org/10.1007/S11056-019-09734-9/TABLES/2
- Sales, G. de B., Lessa, T. A. M., Freitas, D. A., Veloso, M. das D. M., Silva, M. L. de
- S., Fernandes, L. A., & Frazão, L. A. (2020). Litterfall dynamics and soil carbon
- and nitrogen stocks in the Brazilian palm swamp ecosystems. Forest Ecosystems,
- 7(1), 1–12. https://doi.org/10.1186/S40663-020-00251-2/FIGURES/5
- 884 Samani, K. M., Pordel, N., Hosseini, V., & Shakeri, Z. (2020). Effect of land-use
- changes on chemical and physical properties of soil in western Iran (Zagros oak
- forests). *Journal of Forestry Research*, 31(2), 637–647.
- 887 https://doi.org/10.1007/S11676-018-0799-Y/FIGURES/3
- Santana, M. da S., Andrade, E. M. de, Sampaio, E. V. de S. B., Ferreira, T. O.,
- 889 Salviano, A. M., Silva, D. J. da, Cunha, T. J. F., & Giongo, V. (2022). Do
- agrosystems change soil carbon and nutrient stocks in a semiarid environment?
- *Journal of Arid Environments*, 201, 104747.
- 892 https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2022.104747
- Santana, M. da S., Sampaio, E. V. de S. B., Giongo, V., Menezes, R. S. C., Jesus, K. N.
- de, Albuquerque, E. R. G. M. de, Nascimento, D. M. do, Pareyn, F. G. C., Cunha,
- T. J. F., Sampaio, R. M. B., & Primo, D. C. (2019). Carbon and nitrogen stocks of
- soils under different land uses in Pernambuco state, Brazil. Geoderma Regional,
- 897 *16*, e00205. https://doi.org/10.1016/J.GEODRS.2019.E00205
- 898 Santos, U. J. dos, de Sá Barretto Sampaio, E. V., de Andrade, E. M., de Siqueira Pinto,
- A., de Oliveira Dias, B., de Jesus, K. N., da Silva Santana, M., Althoff, T. D.,
- Fernandes, M. M., & Menezes, R. S. C. (2021). Nitrogen Stocks in Soil Classes
- 901 Under Different Land Uses in the Brazilian Semiarid Region. *Journal of Soil*
- 902 Science and Plant Nutrition, 21(2), 1621–1630. https://doi.org/10.1007/S42729-
- 903 021-00466-4
- 904 Silva, T. G. F., de Queiroz, M. G., Zolnier, S., de Souza, L. S. B., de Souza, C. A. A., de
- Moura, M. S. B., de Araújo, G. G. L., Steidle Neto, A. J., dos Santos, T. S., de
- 906 Melo, A. L., da Cruz Neto, J. F., da Silva, M. J., & Alves, H. K. M. N. (2021). Soil

907 properties and microclimate of two predominant landscapes in the Brazilian 908 semiarid region: Comparison between a seasonally dry tropical forest and a 909 deforested area. Soil and Tillage Research, 207, 104852. 910 https://doi.org/10.1016/J.STILL.2020.104852 911 Schulz, K., Voigt, K., Beusch, C., Almeida-Cortez, J. S., Kowarik, I., Walz, A., & 912 Cierjacks, A. (2016). Grazing deteriorates the soil carbon stocks of Caatinga forest 913 ecosystems in Brazil. Forest Ecology and Management, 367, 62–70. 914 https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2016.02.011 915 Teramage, M. T., Asfaw, M., Demissie, A., Feyissa, A., Ababu, T., Gonfa, Y., & Sime, 916 G. (2023). Effects of land use types on the depth distribution of selected soil 917 properties in two contrasting agro-climatic zones. *Heliyon*, 9(6). 918 https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17354 919 Tomar, U., & Baishya, R. (2020). Moisture regime influence on soil carbon stock and 920 carbon sequestration rates in semi-arid forests of the National Capital Region, 921 India. Journal of Forestry Research, 31(6), 2323–2332. 922 https://doi.org/10.1007/S11676-019-01032-6 923 Wang, L., Zhang, G., Zhu, P., Xing, S., & Wang, C. (2022). Soil C, N and P contents 924 and their stoichiometry as affected by typical plant communities on steep gully 925 slopes of the Loess Plateau, China. CATENA, 208, 105740. 926 https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2021.105740 927 Wang, Z., Li, X., Mao, Y., Li, L., Wang, X., & Lin, Q. (2022). Dynamic simulation of 928 land use change and assessment of carbon storage based on climate change 929 scenarios at the city level: A case study of Bortala, China. Ecological Indicators, 930 134, 108499. https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.108499 931 Wijitkosum, S. (2016). The impact of land use and spatial changes on desertification 932 risk in degraded areas in Thailand. Sustainable Environment Research, 26(2), 84-933 92. https://doi.org/10.1016/J.SERJ.2015.11.004 934 Wright, A. L. (2009). Soil phosphorus stocks and distribution in chemical fractions for 935 long-term sugarcane, pasture, turfgrass, and forest systems in Florida. Nutrient 936 Cycling in Agroecosystems, 83(3), 223–231. https://doi.org/10.1007/S10705-008-937 9213-Z/FIGURES/6 938 Zhao, Y., Zhao, M., Qi, L., Zhao, C., Zhang, W., Zhang, Y., Wen, W., & Yuan, J. 939 (2022). Coupled Relationship between Soil Physicochemical Properties and Plant

Diversity in the Process of Vegetation Restoration. Forests 2022, Vol. 13, Page

648, 13(5), 648. https://doi.org/10.3390/F13050648 Zhou, W., Li, C., Zhao, W., Stringer, L. C., & Fu, B. (2023). Spatial distributions of soil nutrients affected by land use, topography and their interactions, in the Loess Plateau of China. International Soil and Water Conservation Research. https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2023.02.005 Zhu, H., Wu, J., Guo, S., Huang, D., Zhu, Q., Ge, T., & Lei, T. (2014). Land use and topographic position control soil organic C and N accumulation in eroded hilly watershed of the Loess Plateau. CATENA, 120, 64-72. https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2014.04.007

- 1 CAPÍTULO 3 – DEPOSIÇÃO, SAZONALIDADE E DETERMINANTES
- 2 CLIMÁTICOS NA PRODUÇÃO DE SERAPILHEIRA E SEUS COMPONENTES
- EM UMA FLORESTA TROPICAL SECA: UMA OBSERVAÇÃO DE CINCO 3
- 4 **ANOS**

5 **RESUMO**

- 6 A produção de serapilheira é um processo ecossistêmico responsável pela entrada e saída 7
- de matéria orgânica nos ecossistemas através da queda do material vegetal. No entanto,
- 8 na Caatinga cerca de 40% da cobertura vegetal já foi modificada com implicações para a 9 perda de serapilheira, que contribui para o aumento da fertilidade e respiração do solo,
- além de evitar sua degradação e erosão. Neste estudo avaliamos a deposição e 10
- 11 decomposição da serapilheira durante cinco anos, sua relação com as variáveis
- 12 meteorológicas, concentração, retorno e eficiência no uso de nutrientes. A produção
- 13 média anual de serapilheira foi de 864,69 kg MS ha⁻¹ para o período avaliado, com maior
- deposição durante a estação seca. A fração foliar foi o principal componente, 14
- 15 correspondendo a 61% da serapilheira total. A produção de folhas foi positivamente
- 16 correlacionada a velocidade do vento e negativamente a radiação solar global, radiação
- 17 líquida, temperatura do dossel e temperatura do solo. As frações galhos e estruturas
- 18 reprodutivas foram negativamente correlacionadas a velocidade do vento, temperatura do
- 19 solo e positivamente a umidade volumétrica do solo. A taxa média de decomposição foi
- de 1,60 com variações 0,14 a 3,99 ao longo dos cinco anos avaliados. O retorno de 20
- 21 nutrientes foi equivalente a produção de serapilheira, principalmente para o Ca (39,4 kg
- ha⁻¹), N (20,7 kg ha⁻¹) e K (13,1 kg ha⁻¹). A eficiência no uso de nutrientes foi 22
- 23 relativamente alta para o P, Mg e K. Nossos resultados indicaram que a Caatinga
- 24 apresenta um padrão sazonal unimodal de deposição de serapilheira, com maior produção
- 25 em anos mais chuvosos e picos de produção na transição entre a estação chuvosa e seca.
- 26 A produção de serapilheira atua como fonte de nutrientes para o solo, protegendo o
- 27 mesmo dos impactos ocasionados pelas condições ambientais (i.e., radiação solar, chuva).
- 28 Palavras-chave: Caatinga; dinâmica de nutrientes; decomposição; espécies decíduas.

29

30

31

ABSTRACT

33

34 Litter production is an ecosystem process responsible for the entry and exit of organic 35 matter into ecosystems through the fall of plant material. However, in the Caatinga around 36 40% of the vegetation cover has already been modified with implications for the loss of 37 litter, which contributes to increasing soil fertility and respiration, in addition to 38 preventing its degradation and erosion. In this study we evaluated the deposition and 39 decomposition of litter over five years, its relationship with meteorological variables, 40 concentration, return and efficiency in the use of nutrients. The average annual litter production was 864.69 kg DM ha⁻¹ for the period evaluated, with greater deposition 41 during the dry season. The leaf fraction was the main component, corresponding to 61% 42 43 of the total litter. Leaf production was positively correlated with wind speed and 44 negatively correlated with global solar radiation, net radiation, canopy temperature and 45 soil temperature. The fractions of branches and reproductive structures were negatively 46 correlated with wind speed, soil temperature and positively with soil volumetric moisture. 47 The average decomposition rate was 1.60 with variations from 0.14 to 3.99 over the five 48 years evaluated. Nutrient return was equivalent to litter production, mainly for Ca (39.4) kg ha⁻¹), N (20.7 kg ha⁻¹) and K (13.1 kg ha⁻¹). Nutrient use efficiency was relatively high 49 50 for P, Mg and K. Our results indicated that the Caatinga presents a unimodal seasonal 51 pattern of litter deposition, with greater production in rainier years and production peaks 52 in the transition between the rainy season and dry. Litter production acts as a source of 53 nutrients for the soil, protecting it from impacts caused by environmental conditions (i.e., 54 solar radiation, rain).

Keywords: Caatinga; nutrient dynamics; decomposition; deciduous species.

5657

55

58

5960

61

62

63

64

1. INTRODUÇÃO

O bioma Caatinga é uma floresta tropical sazonalmente seca (FTSS), endêmica do Brasil, que recobre grande parte do Nordeste brasileiro além de ser uma das maiores regiões semiáridas da América do Sul (Silva et al., 2019; Jardim et al., 2022). Com grande variabilidade climática, a Caatinga abriga um amplo espectro de formações fitogeográficas com a ocorrência de espécies endêmicas; caracterizada por um mosaico de espécies xerófitas e caducifólias (Bezerra-Gusmão et al., 2011; Barbosa et al., 2019). Apesar da vasta biodiversidade presente na Caatinga, cerca de 40% da sua cobertura vegetal já foi modificada (Mapbiomas, 2022), com implicações para a perda de serapilheira que contribui para o aumento da fertilidade e respiração do solo, além de evitar sua degradação e erosão.

A produção de serapilheira é um processo ecossistêmico responsável pela entrada e saída de matéria orgânica no solo através da queda do material vegetal (Asigbaase et al., 2021; Becker et al., 2015; Jia et al., 2020); além de desempenhar um papel crucial na ciclagem de nutrientes nos ecossistemas florestais (Williams-Linera et al., 2021). A deposição do material decíduo é a principal fonte de matéria orgânica e energia para os organismos presentes no solo, contribuindo para o crescimento da vegetação, recuperação e conservação de ambientes degradados (Becker et al., 2015; Queiroz 2020; Rai et al., 2016; Tesfay et al., 2020; Wu et al., 2021). Adicionalmente, em regiões semiáridas, a serapilheira desempenha um papel crucial, protegendo a camada mais superficial do solo da intensa radiação solar, e consequentemente, na retenção de umidade, uma vez que os solos da Caatinga dispõem de baixa capacidade de infiltração e altas taxas de escoamento superficial (Lopes et al., 2015).

Nesta perspectiva, em florestas sazonalmente secas como a Caatinga, a produção de serapilheira ocorre principalmente durante o período seco, como mecanismo a fim de evitar a perda de água via transpiração devido ao déficit hídrico presente na região (Queiroz et al., 2019; Morffi-Mestre et al., 2020; Souza et al., 2019). A sazonalidade da serapilheira está associada as características fenológicas das espécies, predominantemente decíduas, sendo que o tecido foliar compõe maior parte do material decíduo (Chave et al., 2009; Souza et al., 2019; Alberton et al., 2019, 2023). Além da fração foliar, a serapilheira é composta por galhos, caules, estruturas reprodutivas, e miscelânia (e.g., dejetos animais, insetos), com maior contribuição da fração foliar na produção anual (Lopes et al., 2015; Pérez-Suárez et al., 2009). A dinâmica espaçotemporal da serapilheira pode ser influenciada por fatores como a composição de espécies, distúrbios antropogênicos, altitude, latitude, condições climáticas (Zhu et al., 2019; Shen et al., 2019) e estádio sucessional (Correia et al., 2016).

A produção de serapilheira tem sido correlacionada com as condições ambientais (i.e., radiação solar, temperatura, chuva, nutrientes do solo) (Araújo et al., 2019; Queiroz et al., 2019; Souza et al., 2019). Por exemplo, Queiroz et al. (2019) constataram um comportamento inversamente proporcional entre a deposição de serapilheira e a intensidade de radiação solar, sendo o déficit de pressão de vapor e o fluxo de calor no solo as variáveis ambientais que mais influenciam na deposição de folhas. Por outro lado, Araújo et al., (2020) observaram que a produção de serapilheira foliar teve forte correlação com a chuva e a evapotranspiração real para o mês de análise. No entanto, até o presente momento a maioria dos estudos que investigaram a produção de serapilheira na Caatinga foram de curto prazo (Moura et al.; 2016; Queiroz et al., 2019; Araújo et al., 2020; Oliveira et al., 2019), o que dificulta avaliar os padrões inter e intra-anuais da deposição, além de modelar e estimar os possíveis efeitos das mudanças climáticas para a Caatinga (Morffi-Mestre et al., 2020).

Desta forma, avaliar a deposição e decomposição de serapilheira em detrimento das condições climáticas atuais pode fornecer informações para um melhor desempenho dos modelos climáticos, além de subsidiar projeções acerca da ciclagem de nutrientes em florestas secas (Queiroz et al., 2019). No entanto, ainda são escassos os estudos que avaliaram a serapilheira a longo prazo associando-a as variáveis climáticas em florestas tropicais secas como a Caatinga, ainda que estas tenham maior ocorrência e estão expostas aos distúrbios antropogênicos (Amorim et al., 2014; Queiroz et al., 2019; Morffi-Mestre et al., 2020).

Nesta perspectiva, o presente estudo objetivou compreender a variação sazonal da deposição da serapilheira e sua decomposição ao longo de cinco anos consecutivos, identificar as variáveis micrometeorológicas que influenciam na deposição total e das frações da serapilheira e quantificar as concentrações de nutrientes que retornam ao solo via decomposição. Buscamos compreender como esses fatores influenciam na deposição de serapilheira e entender as consequências dessas respostas no cenário atual de avanço das mudanças climáticas e aos distúrbios antropogênicos. Até onde sabemos, este é o primeiro estudo que avalia uma série de cinco anos da dinâmica da serapilheira para a Caatinga. Neste sentido, os objetivos propostos neste estudo buscam atender os padrões

de desenvolvimento sustentável no Brasil (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) para garantir a proteção dos ecossistemas terrestres e a mitigação da mudança global do clima de acordo com as ODS 13 e 15.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Descrição da área de estudo

O estudo foi conduzido em uma propriedade privada no semiárido brasileiro, localizada no município de Floresta, Pernambuco (08°18'31" S, 38°31'37" W, 378 m) (Figura 1). Conforme a classificação de Köppen, o clima é Semiárido do tipo BSh, quente e seco (Alvares et al., 2013), com temperatura média de 26,1 °C e chuva pluvial de 489,3 mm estando concentrada entre os meses de dezembro a abril (Tabela 1) (Queiroz et al., 2019). As propriedades físico-químicas do solo foram coletadas na profundidade de 0-0,40 cm (Tabela 2), sendo o solo classificado como Luvissolo Crômico (Santos et al., 2018).

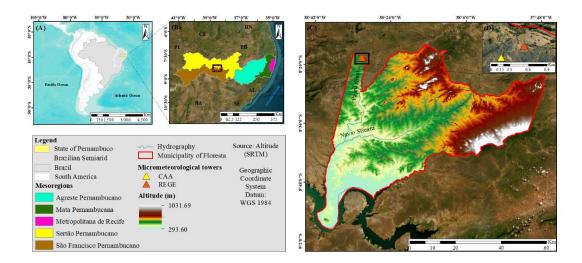


Figura 1. Localização da área experimental em uma área de Caatinga preservada, no município de Floresta, Pernambuco, Sertão Central do Brasil.

Tabela 1. Normal climatológica (1961-1990) para os elementos meteorológicos no município de Floresta, PE, no sertão Central do Brasil.

Mês	T_{N}	Tair	T_X	UR	VV	Chuva	Rg	ET ₀
<u> </u>		°C		%	m s ⁻¹	mm	MJ m ⁻² dia ⁻¹	mm
Janeiro	21,7	27,4	34,7	59,9	2,0	66,1	23,4	5,9
Fevereiro	21,5	26,7	33,9	63,8	1,9	79,4	23,6	5,7

Março	21,4	26,5	33,6	68,5	1,9	104,3	23,2	5,5
Abril	21,0	26,0	32,8	70,4	1,9	66,7	21,5	5,0
Maio	20,2	25,0	31,8	70,4	2,0	37,2	18,7	4,4
Junho	18,9	23,8	30,7	70,1	2,4	19,9	16,9	4,2
Julho	18,1	23,3	30,4	69,0	2,5	16,6	17,9	4,3
Agosto	18,1	24,1	31,7	61,1	2,7	7,0	21,8	5,4
Setembro	19,3	25,9	33,7	54,1	2,9	7,6	23,8	6,3
Outubro	20,8	27,6	35,3	50,3	2,7	12,1	25,5	6,8
Novembro	21,8	28,3	36,0	50,8	2,4	22,6	25,7	6,8
Dezembro	22,0	28,0	35,2	54,2	2,1	49,8	24,1	6,3
Anual	20,4	26,1	33,3	61,9	2,3	489,3	22,2	5,5

 T_N : temperatura mínima, Tair: temperatura média, T_X : temperatura máxima; VV – velocidade do vento, Rg: radiação solar global e ET_0 : evapotranspiração de referência

Tabela 2. Caracterização físico-química do solo em área do bioma Caatinga, localizado no município de Floresta, PE, no sertão Central do Brasil.

Profundidade	CC	PM	Ds	Dp	Pt	Areia	Silte	Argila
cm	dag	kg ⁻¹	kg	m ⁻³	%		g kg ⁻¹	
	10,58	7,42	1,45	2,51	41,79	675,25	211,12	113,63
_	COT	P		K^+	Ca^{2+}		Mg^{2+}	Na ⁺
0-40								
_	mg o	dm ⁻³			ı	cmol _c dm ⁻	3	
	5,16	4,78		0,20	6,06		2,71	0,35

CC: capacidade de campo, PM: ponto de murcha permanente; Ds: densidade aparente, Dp: densidade da partícula, Pt: porosidade total e COT: carbono orgânico total.

A área experimental é composta por vegetação de Caatinga com cerca de 200 hectares. Na área são observadas a predominância de algumas espécies, como *Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae), *Commiphora leptophloeos* (Mart.) J.B. Gillett (Burseraceae), *Cnidoscolus quercifolius* Pohl. e *Croton blanchetianus* Baill. (Euphorbiaceae); *Aspidosperma pyrifolium* Mart. (Apocinaceae), *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis (Fabaceae), *Schinopsis brasiliensis* Engl. (Anacardiaceae), e *Myracrodruon urundeuva* Allemão (Anacardiaceae), conforme o levantamento fitossociológico de Queiroz et al. (2020). Além disso, a área apresenta densidade de suporte de 930 árvores ha⁻¹, com diâmetro da altura do peito (DAP) de 5 cm e 26 cm, enquanto o diâmetro médio na base (DMB) foi de 7 cm e 33 cm, e a altura média de 3 m e 8 m, para as plantas de porte arbóreo e arbustivo, respectivamente.

2.2. Coleta de serapilheira, decomposição e análise química

Instalamos 32 armadilhas abaixo de cada copa das espécies avaliadas, com dimensões de 0,50 m x 0,50 m (0,25 m²), e posicionadas a 1 m de distância da superfície do solo. Cada armadilha por sua vez, foi confeccionada com tela de malha de nylon (1 mm). O período de deposição da serapilheira foi composto por uma série de cinco anos de monitoramento, o equivalente a janeiro de 2018 a dezembro de 2022 (61 meses).

A deposição de serapilheira foi monitorada nas seguintes espécies: *S. tuberosa, C. leptophloeos, C. quercifolius, C. blanchetianus, A. pyrifolium, C. pyramidale, S. brasiliensis* e *M. urundeuva*. As características das espécies podem ser consultadas na Tabela 3. A serapilheira depositada nas armadilhas foi coletada mensalmente, sendo separada e classificada em folhas, galhos (cascas), estruturas reprodutivas (i.e., flores, inflorescências, frutos e sementes) e miscelânia (i.e., dejetos animais e estruturas não identificadas) (Figura 2). Após a separação da serapilheira, as amostras foram secas em estufa de ventilação forçada a 65 °C até atingir o peso constante e, em seguida, o material foi pesado em balança analítica. A contribuição da serapilheira por hectare (kg ha⁻¹) foi estimada com base na área de cobertura vegetal e a quantidade mensal de matéria seca por amostra (0,25 m⁻²) (Tabela 4). O material depositado no solo também foi coletado de forma aleatória próximo aos coletores através de uma armação de madeira de 0,50 m x 0,50 m.

Tabela 3. Características das espécies predominantes em um fragmento de Caatinga, utilizadas para monitorar a deposição da serapilheira no município de Floresta, Pernambuco.

Espécies	DR(i)	DAP	ALT
Especies		cm	m
Spondias tuberosa	0.02	19	5
Comiphora leptophloeos	0.03	15	5
Cnidosculus quercifolius	0.04	6	6
Aspidosperma pyrifolium	0.29	7	4
Cenostigma pyramidale	0.45	7	4
Croton blanchetianus	0.07	7	4
Myracrodruon urundeuva	0.01	13	7
Schinopsis brasiliensis	0.02	45	15

DR – dominância relativa, DAP – diâmetro da altura do peito e ALT – altura.

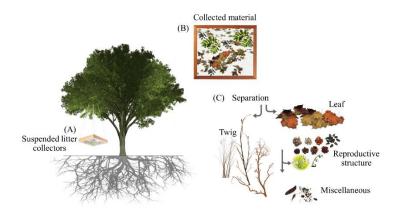


Figura 2. Ilustração esquemática dos coletores e da deposição de serapilheira e suas frações presentes nos coletores.

Tabela 4. Proporção da área (%) de cada uso do solo em relação a área total de serrapilheira de 2018 a 2022.

Uso do solo			Ano		
030 do 3010	2018	2019	2020	2021	2022
Caatinga	38.16323	37.92350	41.96047	58.03284	57.94097
Pastagem	12.18351	11.04713	10.16305	9.008399	8.566736
Agropecuária	49.64846	51.02456	47.87167	32.95396	33.48749
Solo exposto	0.004803	0.004802	0.004803	0.004802	0.004803

Após a secagem em estufa as amostras foram misturadas para obtenção de amostras compostas para cada data de coleta e, posteriormente, foram trituradas em um moinho Wiley com malha de 2 mm. Posterior a isso, as amostras foram encaminhadas para o laboratório da Plant & Solo para a análise química para obtenção do teor de nutrientes conforme a metodologia proposta por Teixeira et al. (2017). A exportação de nutrientes foi avaliada conforme os teores de potássio (K⁺), cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺). O teor de potássio e sódio (Na⁺) foram determinados através do método de fotometria de chama; enquanto o teor de cálcio, magnésio e sódio por meio da espectrofotometria de absorção atômica (posterior a digestão perclórica de nitrato) (Loupassaki et al., 2002; Jardim et al., 2023). O total de nutrientes presentes em cada fração das amostras foi calculado multiplicando o teor de nutrientes pela quantidade de matéria seca total.

As taxa de decomposição, tempo médio de residência da serapilheira foram calculados a partir das seguintes equações (Olson, 1963):

$$k = \frac{L}{X_{SS}} \tag{1}$$

$$214 1/k (2)$$

- em que, *k* é a taxa de decomposição da serapilheira (ano⁻¹) e indica a velocidade do processo de decomposição; L é a serapilheira produzida anualmente (kg ha⁻¹ ano ⁻¹); Xss é a média anual de serapilheira acumulada no solo (kg ha⁻¹ ano⁻¹). Já a durabilidade da serapilheira no solo foi calculada de maneira inversa ao k (1/k), sendo expresso em anos.
- Além disso, o tempo médio de desaparecimento do material foi obtido para 50% (t0,5) 220 e 95% (t0,05) (Eq. (3) e (4)) (Arato et al., 2003; Vital et al., 2004).

$$221 t0.5 = \frac{\ln 2}{k} (3)$$

$$222 t0.05 = \frac{3}{k} (4)$$

A eficiência do uso de nutrientes (EUN) e tempo de retorno (NR) foram calculados a partir das Equações (5), (6) e (7) (Vitousek, 1982).

$$EUN = \frac{L}{NR}$$
 (5)

226 NR =
$$\sum_{i=1}^{n=12} \text{Ci x Mi}$$
 (6)

- em que L é a serapilheira produzida anualmente (kg ha⁻¹ ano ⁻¹), Ci é a média mensal das concentrações dos nutrientes (g kg⁻¹) das amostras de serapilheira, Mi é a produção média
- 229 mensal da serapilheira (g kg⁻¹) e i é o mês da amostra.
- 230 2.3. Cobertura Vegetal Fracionada
- Para estimar a fração de cobertura vegetal (FVC) da área de serrapilheira apresentada na Figura 2 foi utilizado o modelo que descreve a proporção de vegetação escalonando o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) de acordo com o NDVI de vegetação altamente densa (NDVI_v ou V_v) e solo descoberto (NDVI_s ou V_s) (Eq. (8)) (Song et al., 2017, 2022; Zhang et al., 2019).

$$FVC = \frac{NDVI-NDVI_s}{NDVI_s-NDVI_s}$$
 Eq. (8)

Para tanto, os valores de NDVI máximo (NDVI_v) e mínimo (NDVI_s) foram obtidos pelo método tradicional do NDVI conforme proposto por Gutman e Ignatov (1998). Obtidas as imagens, foi calculado o NDVI a partir da expressão subsequente (Eq.

240 (9)) e, finalmente, conseguiu a FVC de 2018 a 2022 com base na média aritmética da FVC da estação seca e chuvosa de cada ano.

242 NDVI=
$$\frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4}$$
 Eq. (9)

- onde, ρ_4 e ρ_5 correspondem as reflectâncias das bandas 4 e 5 do Landsat 8, computadas automaticamente pelo *plugin* SCP do *software* QGIS.
- E para alcançar a FVC média para cada uma das quatro coberturas identificadas na área de serrapilheira, exportou separadamente cada uma das classes de uso e cobertura do solo de 2018 a 2022, e estas saídas foram usadas como máscaras para recortar a FVC média de cada ano da série de dados.

2.4. Análise estatística

No presente estudo, os dados foram divididos em dois grupos. O grupo 1 denominado de "Condições ambientais" é composto pelas variáveis meteorológicas (Tair – temperatura do ar, RH – umidade relativa, Rn – radiação líquida, Td – temperatura do dossel, Tsolo – temperatura do solo, Rg – radiação solar global, ET₀ – evapotranspiração de referência, DPV – déficit de pressão de vapor, VV – velocidade do vento, e θsolo – umidade volumétrica do solo). Dentro deste grupo são considerados os valores médios e/ou acumulados das variáveis meteorológicas dentro do período experimental. O grupo 2, nomeado de "Serapilheira" foi composto pela deposição das frações de serapilheira (i.e., folhas, galhos, estruturas reprodutivas e miscelânea). As condições ambientais são as variáveis explicativas, enquanto a serapilheira foi considerada como grupo resposta. A princípio, os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Lilliefors, Anderson-Darling e Jarque-Bera (p<0,05). Após isso, as variáveis respostas foram relacionadas as variáveis explicativas por meio da matriz de correlação de Pearson. Para tanto, o coeficiente de correlação linear de Pearson (r) foi utilizado para avaliar a existência e direção, além de medir o grau de intensidade da inter-relação entre as variáveis.

Posterior a isso, o diagnóstico de multicolinearidade foi aplicado somente para as variáveis respostas e explicativas que apresentarem correlações significativas. O número de condição (CN), representa a razão entre o maior e menor valor da matriz de correlação e utilizá-lo a fim de avaliar a existência de valores fortes (CN > 1000), moderados (100 < CN < 1000) e fracos (CN < 100) (Montogomery et al., 2021). Contudo, as variáveis explicativas que apresentaram multicolinearidade fraca, foram submetidas à análise de

correlação canônica para analisar eventuais associações entre os grupos, para isso o teste do qui-quadrado foi utilizado para verificar a significância das correlações (p<0,05).

Além disso, a produção média anual de serapilheira das oito espécies ao longo dos cinco anos avaliados foram submetidas a análise de variância (ANOVA), seguido pelo teste de Fisher (p<0,05), a fim de avaliar se houve diferença na produção de serapilheira pelas espécies ao longo dos anos. As frações da serapilheira (folhas, galhos, flores, miscelânia), as espécies e as variáveis meteorológicas foram submetidas à análise de componentes principais (PCA) possibilitando uma análise multidimensional dos dados, ordenando-os em eixos de acordo com suas semelhanças em relação às variáveis utilizadas. Todas as análises estatísticas foram realizadas nos softwares XLSTAT (Addinson, Paris, Franca, www.xlstat.com) e R.

3. RESULTADOS

3.1. Condições ambientais

A Figura 3 apresenta as condições ambientais para o período experimental. Durante o período avaliado a temperatura média do ar foi de 26,6 °C em 2018, 26,7 °C em 2019, 26,1 °C em 2020, 26,5 °C em 2021 e 25,4°C em 2022, sendo este o ano com menor temperatura do ar (Figura 3A). Os valores mínimos de temperatura foram registrados em julho de ambos os anos com 24,0 °C, 23,4 °C, 23,3 °C, 24,1 °C e 22,4 °C para 2018, 2019, 2020, 2021 e 2022, respectivamente. Já os valores máximos da temperatura do ar foram observados entre os meses de outubro e novembro, de modo que, em 2018 a máxima foi de 29,1 °C, 29,3 °C em 2019, 29,7 °C em 2020, 28,8 °C em 2021 e 27,7 °C em 2022. Por outro lado, 2022 foi o ano com maior umidade relativa do ar, com média de 70,2%, seguido pelos anos de 2020 com 66,6%, 2021 com 63,4%, 2018 com 62,5% e 2019 com 62,1% (Figura 3A). A radiação solar global foi de 21,3 MJ m⁻² em 2018 e 2019, 20,4 MJ m⁻² em 2020, 20,2 MJ m⁻² em 2021 e 20,3 MJ m⁻² em 2022 (Figura 3A).

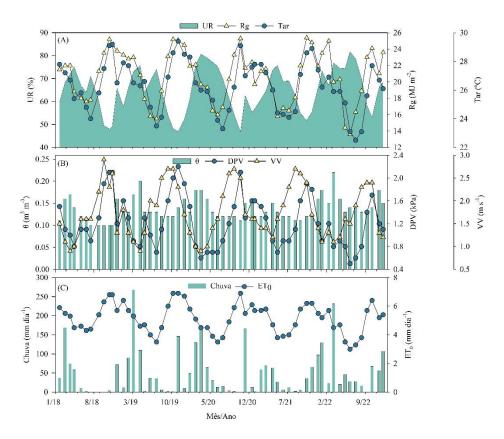


Figura 3. Temperatura média do ar (Tar, °C), umidade relativa do ar (UR, %), radiação solar global (Rg, MJ m⁻²), umidade volumétrica do solo (θ, m³ m⁻³), déficit de pressão de vapor (DPV, kPa), velocidade do vento (VV, m s⁻¹), chuva (mm dia⁻¹) e evapotranspiração de referência (ET₀, mm dia⁻¹) para o período de janeiro de 2018 a dezembro de 2022, no município de Floresta, Pernambuco, Brasil.

A umidade volumétrica do solo foi de 0,12 m³ m⁻³ em 2018, 0,14 m³ m⁻³ em 2019 e 2020, 0,13 m³ m⁻³ em 2021 e 0,15 m³ m⁻³ em 2022 (Figura 3B). O déficit de pressão de vapor foi de 1,3 kPa em 2018 e 2021, 1,4 kPa em 2019, 1,2 kPa em 2020 e 1,0 kPa em 2022 (Figura 3B). A velocidade do vento para o período avaliado foi de 1,7 m s⁻¹ em 2018 e 2020, 1,9 m s⁻¹ em 2019 e 2021 e 1,6 m s⁻¹ em 2022 (Figura 3B). A chuva média foi maior em 2022 com 755,4 mm seguido por 2019, 2020, 2021 e 2018 com média de 717,7 mm ano⁻¹, 658,2 mm ano⁻¹, 447,5 mm ano⁻¹ e 427,9 mm ano⁻¹, respectivamente (Figura 3C). A evapotranspiração de referência foi de 5,5 mm em 2018, 5,4 mm em 2019, 5,0 mm em 2020, 5,2 mm em 2021 e 4,7 mm em 2022 (Figura 3C).

3.2. Dinâmica sazonal da produção de serapilheira na Caatinga

A produção anual de serapilheira apresentou variações inter e intra-anual com comportamento sazonal ao longo do período analisado (Figura 4F). A deposição de serapilheira mensal para os anos de 2018 a 2022 apresentou variações de 7,89 a 218,57

kg MS ha⁻¹, com maior produção de serapilheira total em 2022 com 1.390,9 kg MS ha⁻¹, seguido pelos anos de 2021, 2020, 2019 e 2018, com 923,4, 912,8, 640,4 e 456,1 kg MS ha⁻¹, respectivamente (Figura 1F). Além disso, a menor produção de serapilheira anual foi equivalente a menor chuva anual de 428 mm em 2018, seguida por 2021, 2020, 2019 e 2022 com chuva pluvial de 447,5, 658,2, 717,7 e 755,4 mm, respectivamente. De modo geral, torna-se evidente que os maiores picos de produção total de serapilheira são coincidentes aos meses com menor chuva (Figura 4A). Em 2018 os meses com maiores produções foram maio, junho e julho com produção de 94,7 kg MS ha⁻¹ para o mês de maio e 69,4 kg MS ha⁻¹ para os meses de junho e julho; com eventos de chuva inferiores a 10 mm para estes meses. De modo semelhante, em 2019 observou-se picos de produção para os meses de abril a julho, de modo que, para o mês de abril registrou-se um valor médio de 88,8 kg MS ha⁻¹, 81,9 kg MS ha⁻¹ para o mês de maio, 174 kg MS ha⁻¹ para o mês de junho e 62,4 kg MS ha⁻¹ para o mês de julho. Em 2020 foi observado produção de serapilheira acima de 70 kg MS ha⁻¹ para os meses de março a julho e setembro. Por outro lado, em 2021 a maior deposição de serapilheira se concentrou entre os meses de junho a setembro com médias acima de 100 kg MS ha⁻¹. Diferentemente, 2022 foi o ano com maior pico de deposição de serapilheira onde entre os meses de fevereiro a maio, agosto e de outubro a dezembro houve uma produção média de 126,2 kg MS ha⁻¹, sendo que apenas no mês de maio houve uma deposição de 219,6 kg MS ha⁻¹. Além disso, os meses com menor deposição de serapilheira foram setembro, novembro e dezembro em 2018, sendo os dois últimos equivalentes a 2019; fevereiro e outubro em 2020, outubro em 2021 e janeiro e setembro em 2022. A deposição dos componentes da serapilheira também apresentaram variações sazonais com diferentes picos ao longo dos anos analisados.

316

317

318

319

320

321

322

323

324

325

326

327

328

329

330

331

332

333

334

335

336

337

338

339

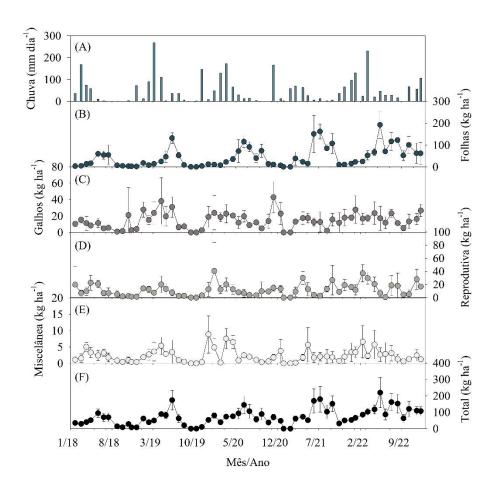


Figura 4. Deposição e sazonalidade da serapilheira e da chuva em um fragmento de Caatinga, no município de Floresta, Pernambuco, Brasil, de janeiro de 2018 a dezembro de 2022.

Entre as frações da serapilheira, a deposição do tecido foliar foi maior em relação as outras frações (Figura1B) seguindo o mesmo comportamento sazonal da serapilheira total correspondendo a 50,4%, 50,3%, 55%, 67% e 68% da serapilheira total para os anos de 2018, 2019, 2020, 2021 e 2022, respectivamente. De modo geral, a maior deposição foliar foi observada para os meses com menor chuva, com valores inferiores a 40 mm (Figura 4A). Observamos que em 2018 a deposição de folhas se concentrou entre os meses de maio a julho com deposição média de 56,47 kg MS ha⁻¹, enquanto em 2019 registrou-se um pico de deposição em junho com 131,9 kg MS ha⁻¹. Em 2020 os maiores picos se concentraram entre os meses de maio a julho, com maior deposição em junho (115,65 kg MS ha⁻¹). Similarmente, em 2021 os meses com maior deposição foliar foram junho e julho com 151,01 e 162,11 kg MS ha⁻¹, respectivamente. No entanto, o maior pico de deposição em 2022 foi registrado em maio com 192 kg MS ha⁻¹, seguido por junho e julho com 71 e 116 kg MS ha⁻¹.

A contribuição da fração de galhos foi a segunda maior em relação aos demais. Assim, a maior deposição de galhos ocorreu em 2019, o equivalente a 29,83% da serapilheira total, seguido pelos anos de 2020 (24,49%), 2018 (21,64%), 2022 (21,28%) e 2021 (15,13%). A deposição de galhos em 2018 foi maior no mês de outubro com 21,16 kg MS ha⁻¹, seguido pelos meses de janeiro a julho de 2019, com valores que oscilaram entre 15 a 30 kg MS ha⁻¹ (média de 25,93 kg MS ha⁻¹ mês). Por outro lado, em 2020 o maior pico registrado foi de 42,93 kg MS ha⁻¹ em novembro. No entanto, em 2021 a deposição foi regular sem grandes picos de deposição, sendo agosto com menor deposição de 2,27 kg MS ha⁻¹, enquanto para os demais meses a deposição oscilou entre 11 a 18 kg MS ha⁻¹. Já em 2022, janeiro, abril, julho e novembro foram os meses com maior deposição de galhos, com valores médios de 27,72, 23,59, 23,23 e 28,07 kg MS ha⁻¹. Além disso, em anos como 2019 o pico de deposição de galhos coincidiu com eventos de chuva acima de 110 mm mês⁻¹.

Para as estruturas reprodutivas (Figura 4D), o maior acúmulo ocorreu em 2018, representando 23% da serapilheira total, seguido por 2020, 2021, 2019 e 2022 com contribuições de 17, 15,48, 15,07 e 13,35% do acumulado total de serapilheira, respectivamente. Em 2018 os meses com maior acúmulo de estruturas reprodutivas foi janeiro, abril e maio com produção de 19,75, 22,70 e 20,85 kg MS há⁻¹, respectivamente. Já em 2019 registrou-se maior acúmulo em abril com 20,15 kg Mháha⁻¹. Em 2020, observamos que em janeiro houve um acúmulo de 40,64 kg MS ha⁻¹, seguido por março (20,09 kg MS ha⁻¹). Por outro lado, em 2021 os meses que obtiveram maior deposição de estruturas reprodutivas foram abril, setembro e novembro com produção de 30,07, 26,69 e 19,12 kg MS ha⁻¹, respectivamente. Diferentemente, fevereiro, março e abril registram maior deposição de estruturas reprodutivas em 2022, com produções equivalentes a 37,18, 29,70 e 20,58 kg MS ha⁻¹, respectivamente.

A fração de miscelânia apresentou contribuições de 4,74% em 2018, 4,77% em 2019, 3,53% em 2020, 2,34% em 2021 e 2,68% em 2022 da serapilheira total. Além disso, os meses com maior acúmulo de miscelânia foi março em 2018, abril e dezembro em 2019, março e abril em 2020, maio em 2021 e fevereiro e abril em 2022.

3.3. Acúmulo mensal e anual de serapilheira para oito espécies da Caatinga

A Figura 5 mostra a deposição de folhas, galhos, estruturas reprodutivas e miscelânia para as oito espécies avaliadas. De modo geral, percebemos que dentre as oito

385 espécies avaliadas, A. pyrifolium foi responsável pela maior deposição foliar para os anos 386 avaliados, com valores de 444,32, 890,9, 995,1 e 1700,8 kg MS ha⁻¹ para 2018, 2020, 387 2021 e 2022, respectivamente. Houve exceção em 2019, em que a maior deposição foi 388 registrada pela C. quercifolius (536.50 kg MS ha⁻¹). Maiores deposições também foram observadas em C. leptophloeos, C. blanchetianus e C. quercifolius com acumulado de 389 390 303,07 kg MS ha⁻¹ em 2018, 394, 93 kg MS ha⁻¹ em 2019, 439,84 kg MS ha⁻¹ em 2020, 314,09 kg MS ha⁻¹ em 2021 e 563,80 kg MS ha⁻¹ em 2022 para C. leptophloeos. Os 391 valores de 253,60, 334,31, 690,44, 977,51 e 1132,08 kg MS ha⁻¹ foram observados para 392 393 C. blanchetianus em 2018, 2019, 2020, 2021 e 2022, respectivamente. C. quercifolius acumulou 252,82 kg MS ha⁻¹ em 2018, 536,50 kg MS ha⁻¹ em 2019, 661,29 kg MS ha⁻¹ 394 em 2020, 688,67 kg MS ha⁻¹ em 2021 e 910,43 kg MS ha⁻¹ em 2022. Por outro lado, M. 395 396 urundeuva foi responsável pela menor deposição foliar, com valores de 67,32 kg MS ha ¹ em 2018, 200,04 kg MS ha⁻¹ em 2020, 107,76 kg MS ha⁻¹ em 2021 e 335,03 kg MS ha⁻ 397 ¹ em 2022. Contudo, em 2019 a menor deposição foliar foi registrada em A. pyrifolium 398 399 (175.57 kg MS ha⁻¹). Além disso, a maior deposição de folhas foi registrada na transição 400 do período chuvoso para o período seco (Figura 5A).

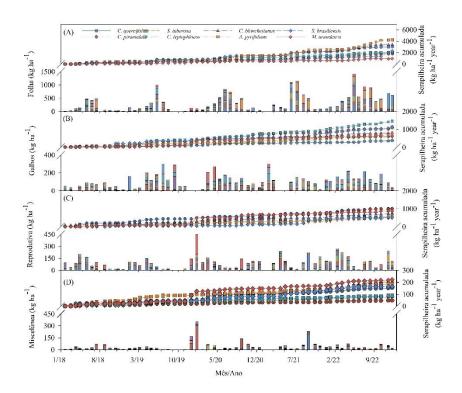


Figura 5. Produção mensal e acumulado de serapilheira durante janeiro de 2018 a dezembro de 2022 para (A) folhas, (B) galhos, (C) estruturas reprodutivas e (D) miscelânea para oito espécies vegetais em um fragmento de Caatinga, no município de Floresta, Pernambuco, Sertão Central do Brasil.

Em contrapartida, observa-se que a deposição de galhos variou ao longo dos anos e em função das espécies, de modo que, *S. brasiliensis* foi responsável pela maior deposição em 2018 com 215,24 kg MS ha⁻¹, seguida por *A. pyrifolium* com 117,12 kg MS ha⁻¹ (Figura 4B). Por outro lado, em 2019 *C. blanchetianus* e *C. leptophloeos* apresentaram maior produção de galhos com 330 e 326 kg MS ha⁻¹, respectivamente. De modo similar, *C. pyramidale* obteve maior produção em 2020 com 390,64 kg MS ha⁻¹, seguida por *C. leptophloeos* com 323,67 kg MS ha⁻¹, a qual registrou maior produção de galhos em 2021 e 2022 com 247,07 e 457,32 kg MS ha⁻¹, respectivamente, com segunda maior produção observada por *S. brasiliensis* com 232,75 e 357, 50 kg MS ha⁻¹. Além disso, a menor produção de galhos foi observada em *C. quercifolius*, especificamente em 2018, 2019 e 2021 com 32,40, 65,55 e 34,53 kg MS ha⁻¹, respectivamente, enquanto para os anos de 2020 e 2022 a menor produção foi registrada por *S. tuberosa* e *M. urundeuva* com 103,83 e 83,79 kg MS ha⁻¹, respectivamente. Além disso, observamos que os meses em que houve maior deposição pelas espécies foram março, abril e maio em 2018 e 2019, abril e maio em 2020, abril e julho em 2021 e junho e julho em 2022. Além disso, entre

os meses de outubro a dezembro houve um aumento cumulativo da deposição de galhos pelas espécies em 2018. Esse mesmo comportamento foi observado a partir de abril em 2019, novembro em 2020 e 2021, e 2022 esse aumento foi observado a partir de julho.

De modo geral, a deposição das estruturas reprodutivas variou ao longo dos anos e dos meses (Figura 5C). Neste contexto, as maiores contribuições de estruturas reprodutivas foram observadas de fevereiro a março em 2018; janeiro, fevereiro e abril em 2019; janeiro, abril e dezembro em 2020; abril, maio e dezembro em 2021 e de fevereiro a abril em 2022. Entre as espécies, C. quercifolius foi uma das que obteve maior deposição de estruturas reprodutivas ao longo dos anos, com acumulado de 214,40, 228,84, 198,67, 148,82 e 225,16 kg MS ha⁻¹ em 2018, 2019, 2020, 2021 e 2022, respectivamente. A partir de 2020 observou-se um aumento na deposição de estruturas reprodutivas em C. pyramidale que apresentou acúmulo de 266,87 kg MS ha⁻¹ em 2020, 217.34 kg MS ha⁻¹ em 2021 e 275,16 kg MS ha⁻¹ em 2022. Contudo, a menor deposição foi registrada em diferentes espécies ao longo dos anos, de modo que, em 2018, 2019 e 2022 S. brasiliensis teve menor deposição de estruturas reprodutivas com 54,47, 1,90 e 105,58 kg MS ha⁻¹, respectivamente, enquanto em 2020 e 2021 a menor deposição foi observada em S. tuberosa e M. urundeuva com 68,22 e 87,24 kg MS ha⁻¹, respectivamente. Para a fração de miscelânia, as maiores contribuições foram observadas para os coletores situados abaixo das espécies de A. pyrifolium em 2018 e 2019 com 43,24 e 48,34 kg MS ha⁻¹, respectivamente; C. quercifolius em 2020 com 56,76 kg MS ha⁻¹ e C. blanchetianus com 30,66 e 62,98 kg MS ha⁻¹ em 2021 e 2022, respectivamente.

3.4. Deposição anual a nível de espécie

A Figura 6 mostra a deposição de serapilheira em função das espécies avaliadas, com exceção de *M. urundeuva* e *C. leptophloeos*, as demais espécies foram estatisticamente diferentes para os cinco anos avaliados (p<0,05). Nota-se que ao longo dos anos, as espécies registraram diferentes acúmulos de serapilheira, de modo que, a maior produção foi registrada em 2022 para *S. brasiliensis*, *C. pyramidale*, *C. quercifolius*, *A. pyrifolium*, *C. blanchetianus* e *S. tuberosa* (p<0,05) (Figura 5B, C, D, E, G, H). Por outro lado, para estas mesmas espécies a menor produção de serapilheira ocorreu em 2018 e 2019. Em termos de Caatinga, o comportamento foi semelhante, com maior produção de serapilheira em 2022, e menor produção observada em 2018 (p<0,05) (Figura 6I).

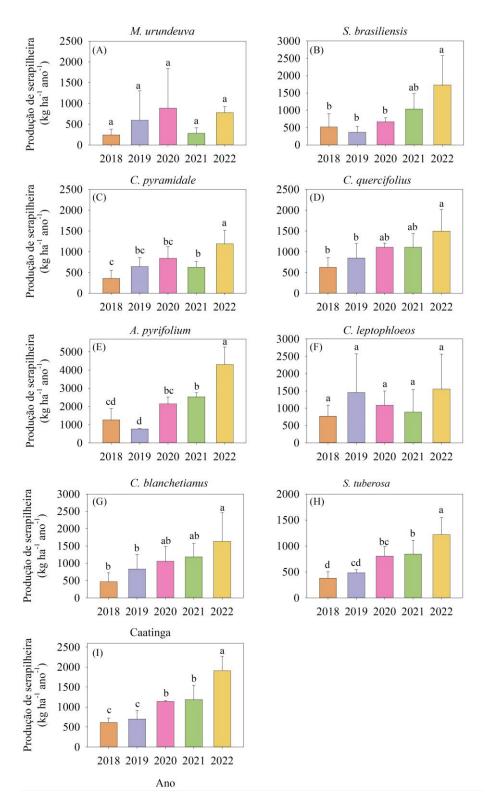


Figura 6. Produção anual de serapilheira em oito espécies vegetais da Caatinga e para toda área de Caatinga, no município de Floresta, Pernambuco, Sertão Central do Brasil.

3.5. Relações entre a deposição de serapilheira para espécies da Caatinga e as variáveis ambientais

448

449

Para as espécies, a análise de correlação canônica mostrou que a deposição de serapilheira da *M. urundeuva* e *S. brasiliensis* não apresentaram relações com as variáveis do grupo resposta e as explicativas (i.e., ambientais). Por outro lado, C. pyramidale e C. leptophloeos obtiveram dois eixos canônicos significativos, enquanto para as demais espécies apenas um eixo foi significativo pelo teste de qui-quadrado (p<0,05) (Tabela 5). Assim, para C. leptophloeos o primeiro eixo canônico indica que sob condições de maior Tsolo e θsolo houve maior deposição da fração de miscelânia. No entanto, a miscelânia não é uma fração de origem vegetal, enquanto o segundo eixo aponta que à medida que há diminuição na radiação solar incidente, houve aumento para a deposição foliar. Já para C. pyramidale observou-se no primeiro eixo conforme Rn, Td, Rg e Tsolo diminuíram com o aumento na deposição da fração foliar; já o segundo eixo mostrou que em função da diminuição da VV, Tsolo e aumento da θsolo há maior deposição da fração de galhos. O mesmo comportamento foi observado para o primeiro eixo de C. quercifolius, no entanto, para a fração reprodutiva. De modo semelhante ao primeiro eixo de C. pyramidale, em C. blanchetianus as condições são mais favoráveis para a maior deposição foliar quando há diminuição na Rn, Td, Rg e θsolo. Por outro lado, em A. pyrifolium o aumento da VV explicou o aumento na deposição da fração foliar. Assim, variações na deposição foliar e nas frações de galho e reprodutiva podem ser associadas as variáveis do grupo explicativo, como observado pelas espécies.

450

451

452

453

454

455

456

457

458

459

460

461

462

463

464

465

466

467

468

469

470

471

472

473

474

Tabela 5. Cargas canônicas entre os grupos de variáveis resposta (folha, galho, órgãos reprodutivas e miscelânia) e as variáveis explicativas (velocidade do vento – VV, radiação líquida – Rn, temperatura do dossel – Td, Chuva, temperatura do solo – Tsolo, radiação solar global – Rg, umidade volumétrica do solo – θsolo e índice de cobertura vegetal – ICV) para as espécies em uma fragmento de Caatinga, no município de Floresta, Pernambuco, Brasil.

Grupo	Variáveis	Myracrodruon urundeuva			deuva	Sci	Schinopsis brasiliensis		
	_	Eixos canônicos			Eixos can	ônicos			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Resposta	Folha	0.30	0.66	-0.08	-0.15	-0.2	7 0.76	-0.32	0.49
	Galho	0.10	0.95	-0.07	1.39	-0.2	9 0.51	-0.46	-0.67
	Reprodutivas	-0.09	0.65	-0.70	-1.47	0.61	0.72	0.25	-0.24
	Miscelânia	0.62	0.72	-0.18	-0.36	-0.6	0.19	0.70	-0.34
	VV	0.21	-0.49	-0.06	-0.44	0.87	-0.03	0.01	-0.01
Explicativo	Rn	-0.84	0.09	-0.21	0.15	-0.0	5 0.53	-0.26	-0.13
	Td	-0.77	-0.10	-0.03	-0.01	0.37	-0.03	-0.45	-0.40
	Chuva	-0.29	-0.12	-0.11	0.80	-0.2	7 -0.02	-0.44	-0.02

	T 1	0.77	0.22	0.10	0.22	0.50	0.16	0.25	0.10
	Tsolo	-0.77	-0.32		-0.22	0.59			-0.10
	Rg	-0.85	-0.14	-0.20		0.38			-0.27
	θsolo	-0.23	0.49	-0.04	0.63	-0.6		-0.31	0.15
C 1 ~ ^ .	ICV	0.21	0.02		-0.02	-0.0		0.25	-0.03
Correlação canônica		0.67	0.57	0.28	0.25	0.53		0.41	0.23
Qui-quadrado		60	28	8	3	42		12	3
Graus de liberdade		32	21	12	5	32		12	5
			stigma			Cni	doscolus q	·	lius
			ixos ca				Eixos cano		
		1	2	3	4	1	2	3	4
Resposta	Folha	0.92	0.27	0.27	-0.10	0.4		-0.06	0.03
	Galho	-0.37	0.74	0.35	-0.45	0.49		0.68	0.52
	Reprodutivas	0.02	0.73	-0.69	-0.02	0.68		-0.52	0.41
	Miscelânia	-0.07	0.51	0.28	0.81	0.60	6 -0.30	0.38	-0.57
	VV	0.22	-0.83	0.08	-0.20	-0.8	1 0.34	0.29	-0.13
	Rn	-0.81	0.26	-0.45	-0.16	0.09	-0.84	0.06	0.02
	Td	-0.68	-0.53	-0.20	0.09	-0.5	2 -0.62	-0.27	-0.32
T	Chuva	-0.38	0.54	-0.05	-0.58	0.48	8 -0.51	0.15	-0.52
Explicativo	Tsolo	-0.69	-0.66	-0.12	-0.04	-0.7	0 -0.55	-0.31	-0.23
	Rg	-0.84	-0.38	-0.27	-0.05	-0.5	2 -0.82	0.06	-0.01
	θsolo	-0.23	0.77		-0.15	0.68	8 -0.43	-0.03	-0.08
	ICV	0.34	0.06	-0.70		0.02		0.11	0.10
Correlação canônica	10 /	0.83*	0.75*	0.28	0.25	0.74		0.25	0.16
Qui-quadrado		114	52	8	3	67		5	1
Graus de liberdade		32	21	12	5	32		12	5
- Grade de Hoerdade			ton bla				idosperma		
			lixos ca			715p	Eixos can		ımı
		1	2	3	4	1	2	3	4
Resposta	Folho	0.94			-0.08				
Resposia	Folha Galho	-0.04	0.30 0.28	0.15 0.91	0.30	0.92 0.12		-0.24 0.27	-0.27 0.74
	Reprodutivas	-0.04	0.28	0.91	-0.25	-0.0		0.27	-0.37
	Miscelânia	-0.48	0.68	-0.20	0.71	-0.0		-0.51	-0.37
	VV	0.39	-0.80	-0.40	0.12		0.61 -0.70		-0.12
	Rn	-0.74	0.27	-0.20	0.23	-0.3		0.79	0.23
	Td	-0.71	-0.55	-0.09 0.68			0.56 -0.70	0.16	-0.02
Evaliantiva	Chuva Tsolo	-0.40	0.25		0.03		0.42 0.41 0.25 -0.67		0.06
Explicativo		-0.60	-0.58	-0.21	0.02			0.32	0.16
	Rg θsolo	-0.78 -0.72	-0.35 -0.53	-0.35 -0.31	0.02).26 -0.59).35 0.46	0.49 0.45	0.11 -0.22
	ICV	0.39	0.36				0.40	0.43	-0.22
Camalagão conânico	IC V								
Correlação canônica		0.79*	0.47	0.35	0.20	0.82		0.41	0.13
Qui-quadrado		73	22	9	2	84		10	1
Graus de liberdade		32	21	12	5	32		12	5
		Sp	ondias	tubero	sa	Com	miphora le	ptophl	oeos

		Е	ixos ca	nônico	S	Eix	xos canó	ònicos	
		1	2	3	4	1	2	3	4
Resposta	Folha	0.69	0.62	0.38	0.02	-0.20	1.02	-0.41	-0.02
	Galho	-0.30	0.42	0.75	-0.41	0.14	0.36	1.03	-0.56
	Reprodutivas	-0.68	0.69	-0.24	0.00	0.52	-0.35	0.15	1.04
	Miscelânia	-0.26	0.02	0.49	0.83	0.67	-0.11	-0.85	-0.39
	VV	0.33	-0.52	-0.56	-0.25	-0.53	0.42	0.52	-0.48
	Rn	-0.86	0.09	0.32	-0.09	-0.02	0.43	0.81	1.01
	Td	-0.64	-0.43	-0.45	0.22	-0.19	0.35	0.01	1.30
Explicativo	Chuva	-0.25	0.07	0.64	-0.06	-0.50	0.12	0.75	-0.36
	Tsolo	-0.59	-0.51	-0.40	0.11	0.78	-0.23	0.08	-0.02
	Rg	-0.84	-0.34	-0.22	-0.16	-0.33	-1.46	-0.63	-1.61
	θ solo	-0.38	0.24	0.75	-0.25	1.08	0.15	-0.35	-0.75
	ICV	0.10	0.70	-0.08	-0.42	-0.14	-0.03	0.63	0.43
Correlação canônica		0.70	0.65	0.46	0.26	0.64*	0.60*	0.30	0.16
Qui-quadrado		80	44	16	4	58	30	6	1
Graus de liberdade		32	21	12	5	32	21	12	5
V-1 * f:	:C: 50/	1	1. 0 :	. 1 1 .					

Valores com * foram significativos a 5% pelo teste de Qui-quadrado.

A análise canônica para a Caatinga apenas um eixo canônico foi significativo entre as variáveis respostas (i.e., fração da serapilheira) e as variáveis explicativas (i.e., condições ambientais) (Tabela 6). Na Caatinga, observa-se que a maior contribuição da serapilheira é dada pela fração foliar quando há diminuição para Rn, Td e Rg. Portanto, as demais frações de galho, estruturas reprodutivas e miscelânea não podem ser associadas ao grupo explicativo, de modo que, apresentam efeitos isolados.

Tabela 6. Cargas canônicas entre os grupos de variáveis resposta (folha, galho, reprodutivas e miscelânia) e as variáveis explicativas (velocidade do vento – VV, radiação líquida – Rn, temperatura da superfície – Td, Chuva, temperatura do solo – Tsolo, radiação solar global – Rg, umidade volumétrica do solo – θsolo e índice de cobertura vegetal – ICV) para um fragmento de Caatinga, no município de Floresta, Pernambuco, Brasil.

Grupo	Variáveis	Eixos canônicos					
		1	2	3	4		
	Folhas	0.89	0.41	0.17	-0.07		
Resposta	Galhos	-0.33	0.71	0.50	-0.37		
	Reprodutiva	-0.31	0.67	0.26	0.62		
	Miscelânia	-0.29	0.85	-0.43	-0.08		
	VV	0.49	-0.73	-0.02	0.02		
	Rn	-0.75	0.18	0.42	0.30		
	Td	-0.61	-0.64	-0.06	0.15		

Explicativo	Chuva	-0.48	0.28	0.63	-0.35
	Tsolo	-0.53	-0.66	0.14	0.22
	Rg	-0.70	-0.47	0.11	0.28
	θ solo	-0.46	0.72	0.23	-0.18
	ICV	0.41	0.33	0.45	0.68
Correlação canônica		0.81*	0.65	0.39	0.37
Qui-quadrado		101	46	16	8
Graus de liberdade		32	21	12	5

Valores com * foram significativos a 5% pelo teste de Qui-quadrado.

3.6. Decomposição, taxa de retorno e eficiência do uso de nutrientes na Caatinga

O retorno médio de nutrientes apresentou diferentes concentrações em função dos anos (Tabela 7). Percebe-se que o maior retorno de nutrientes via serapilheira ocorreu em 2022 para todos os nutrientes, com concentrações de 29,69 kg N ha⁻¹, 2,16 kg P ha⁻¹, 18,83 kg K ha⁻¹, 56,55 kg Ca ha⁻¹, 4,01 kg Mg ha⁻¹ e 1,36 kg Na ha⁻¹. Em contrapartida, o menor retorno de nutrientes ocorreu em 2018, de modo que, as concentrações foram de 14,67, 1,07, 9,30, 27,94, 1,98 e 0,67 kg ha⁻¹ para o N, P, K, Ca, Mg e Na, respectivamente. Para a eficiência do uso dos nutrientes, maiores valores foram observados para o N (87,94 kg ha⁻¹ ano⁻¹) e K (179,97 kg ha⁻¹ ano⁻¹) em 2022. Por outro lado, o P foi mais eficiente em 2018 e 2019 com 1175 e 1148 kg ha⁻¹ ano⁻¹, enquanto o Ca e o Mg foram mais eficientes em 2021 e 2019, respectivamente com 88,64 e 727,22 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 7).

Tabela 7. Retorno de nutrientes (kg ha⁻¹ ano⁻¹) e eficiência do uso dos nutrientes (kg ha⁻¹ ano⁻¹) associados à queda da serapilheira em um fragmento de Caatinga, em Floresta, Pernambuco, Brasil.

	Retorno de nutrientes								
Ano	N	P	K	Ca	Mg	Na			
2018	14.67	1.07	9.30	27.94	1.98	0.67			
2019	16.38	1.19	10.39	31.21	2.21	0.75			
2020	23.55	1.71	14.93	44.85	3.18	1.08			
2021	19.23	1.40	12.19	36.62	2.60	0.88			
2022	29.69	2.16	18.83	56.55	4.01	1.36			
		Efici	iência do uso	de nutriente	es				
2018	85.37	1175.56	134.62	44.82	631.53	1.86			
2019	72.89	1148.21	175.66	38.77	727.22	1.89			
2020	75.19	750.07	157.35	46.44	373.26	3.11			
2021	84.23	662.41	72.92	88.64	295.42	3.36			
2022	87.94	622.34	179.97	46.36	379.79	2.60			

A taxa de decomposição variou ao longo dos anos avaliados como mostra a Tabela 8. Assim, os valores de *k* foram de 0,14, 1,23, 3,99, 2,46 e 0,19 ano⁻¹ para 2018, 2019,

2020, 2021 e 2022, respectivamente, com média de 1,60 ano⁻¹. Além disso, observa-se que o tempo médio de renovação da serapilheira foi de 0,62 com tempos de decomposição de 50 e 95% de 0,43 e 1,87, respectivamente.

Tabela 8. Taxa de decomposição (k, ano^{-1}) , tempo médio de retorno (1/k) e tempos de decomposição de 50% (ln2/k) e 95% (3/k) em um fragmento de Caatinga, em Floresta, Pernambuco, Brasil.

		k			
2018	2019	2020	2021	2022	MÉDIA
0.14	1.23	3.99	2.46	0.19	1.60
1/k		ln2/k		3/k	_
0.62		0.43		1.87	

As concentrações de nutrientes presentes na serapilheira via coletor suspenso mudaram ao longo dos anos para a Caatinga (Figura 7). De modo geral, os nutrientes com maiores concentrações na serapilheira foram N e Ca, com média de 1,73 e 3,29 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para os cinco anos estudados, respectivamente. Além disso, N, P, K, Ca, Mg e Na registraram variações com concentrações máximas em junho de 2018 e 2019; março de 2020, julho de 2021 e maio de 2022; e mínimas em novembro 2018 e 2019; outubro de 2020 e 2021 e setembro de 2022. As médias para estes nutrientes ao longo dos cinco anos foram de 1,22, 1,64, 1,96, 1,60 e 2,47 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para o nitrogênio; 0,09, 0,10, 0,14, 0,14 e 0,18 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para o fósforo; 0,78, 0,87, 1,24, 1,22 e 1,57 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para o potássio; 2,33, 2,60, 3,74, 3,66 e 4,71 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para o cálcio; 0,17, 0,18, 0,27, 0,26 e 0,33 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para o magnésio; e 0,06, 0,06, 0,09, 0,09 e 0,11 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para o sódio em 2018, 2019, 2020, 2021 e 2022, respectivamente.

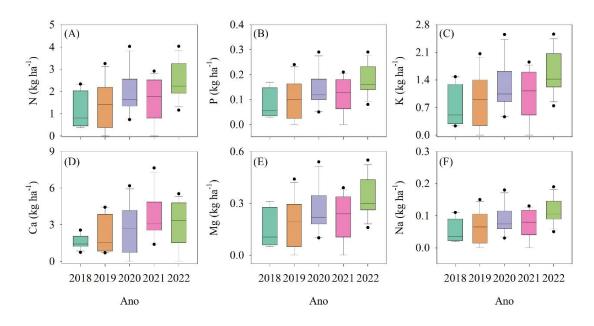


Figura 7. Concentração média anual de nutrientes associados à queda de serapilheira suspensa em um fragmento de Caatinga, no município de Floresta, Pernambuco, Brasil.

A Figura 8 mostra a concentração anual de nutrientes presentes na serapilheira depositada no solo. Desta forma, observa-se que as concentrações dos nutrientes variaram ao longo dos anos, sendo o N e Ca os nutrientes que apresentaram maiores concentrações com 11,61 e 26,71 kg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. Enquanto o Na, P, Mg e K apresentaram as menores concentrações com 0,30, 1,12 e 1,95 e 4,16 kg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente (Figura 7A, B e D). Além disso, a concentração de nutrientes seguiu a ordem crescente com Na > P > Mg > K > N > Ca. Observa-se que os meses com maiores concentrações foram maio em 2018, junho em 2019 e 2021, fevereiro em 2020 e julho em 2022. Em contrapartida, as menores concentrações foram observadas em setembro, abril, outubro, março e fevereiro em 2018, 2019, 2020, 2021 e 2022, respectivamente.

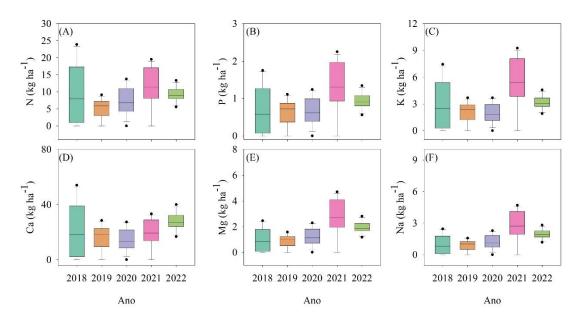


Figura 8. Concentração média anual de nutrientes associados à queda de serapilheira no solo em um fragmento de Caatinga, no município de Floresta, Pernambuco, Brasil.

3.7. Análise de componentes principais (PCA)

Neste estudo, realizamos uma análise de componentes principais para a produção de serapilheira e as variáveis ambientais (Figura 9). Assim, duas componentes principais foram suficientes para explicar 71.8% variabilidade total dos dados, de modo que, a componente principal 1 (PC1) explicou 62.2% mostrando uma correlação positiva entre a produção total de serapilheira, fração foliar, estruturas reprodutivas as quais foram negativamente correlacionadas com Tair, Rg, ET₀, DPV e Td. Por sua vez, a PC2 explicou 9,6% com correlação positiva entre a fração de miscelânea, galhos, chuva e umidade volumétrica do solo. Além disso, *S. brasiliensis* e *C. blanchetianus* estão inseridas na PC2, enquanto *M. urundeuva*, *C. pyramidale*, *C. leptophloeos* e *S. tuberosa* pertencem a PC1.

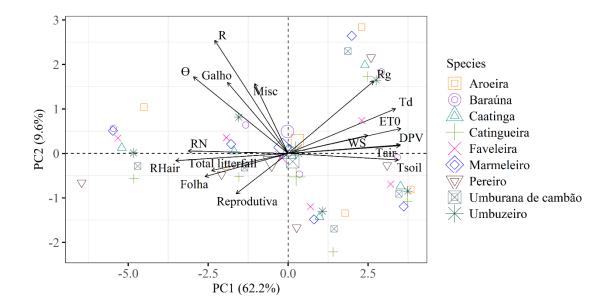


Figura 9. Análise de componentes principais (PCA) para a produção de serapilheira e as variáveis ambientais (temperatura do ar – Tair, radiação solar global – Rg, temperatura da superfície – Td, temperatura do solo – Tsolo, radiação líquida – RN, umidade relativa do ar – Rhair, déficit de pressão de vapor - VPD, evapotranspiração de referência – ET0, velocidade do vento – WS e umidade volumétrica do solo – θ para as espécies Aroeira (*M. urundeuva*), Baraúna (*S. brasiliensis*), Catingueira (*C. pyramidale*), Faveleira (*C. quercifolius*), Marmeleiro (*C. blanchetianus*), Pereiro (*A. pyrifolium*), Umburana de cambão (*C. leptophloeos*) e Umbuzeiro (*S. tuberosa*) em um fragmento de Caatinga, no município de Floresta, Pernambuco, Brasil.

4. DISCUSSÃO

4.1. Dinâmica de deposição e sazonalidade da serapilheira na Caatinga

As florestas tropicais são responsáveis pela maior produção de serapilheira quando comparada a outros ecossistemas terrestres (Marod et al., 2023), de modo que, a produção de serapilheira pode variar em função do tipo de espécie, fenologia, estágio sucessional e conforme as diferenças microclimáticas associadas (Silva et al., 2018; Liao et al., 2006; Zhu et al., 2022). Neste estudo, a produção média anual de serapilheira foi de 864,69 kg MS ha⁻¹, o equivalente a 0,86 t ha⁻¹ ano⁻¹ para os cincos anos avaliados. No entanto, esses valores foram inferiores aos relatados para florestas tropicais secas como a Caatinga (Araújo et al., 2019; Menezes et al., 2012; Morffi-Mestre et al., 2020). A produção de serapilheira em ambientes secos, a exemplo da Caatinga, pode variar entre

1.500 e 3.000 kg MS ha⁻¹ ano⁻¹, e podem ultrapassar 6.000 kg MS ha⁻¹ ano⁻¹ sob condições de maior disponibilidade hídrica no ambiente (Menezes et al., 2012). Em uma floresta tropical seca no México a produção média foi de 5,65 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Morffi-Mestre et al., 2020), no entanto, em uma área de Caatinga, Araújo et al. (2019) relataram valores de produção de serapilheira superiores aos achados neste trabalho, com média de produção de 4,508 kg ha⁻¹ ano⁻¹ e 3,320 kg ha⁻¹ ano⁻¹. Essa variação na produção de serapilheira dentro da Caatinga pode ser associada tanto as condições microclimáticas, como também as condições edáficas, topográficas e diversidade de espécies vegetais e traços funcionais presentes que são responsáveis pela produtividade de ecossistemas áridos e semiáridos (Araújo et al., 2019). Além disso, a área avaliada neste estudo é considerada uma Caatinga com vegetação mais esparsa. Embora a média anual tenha sido abaixo do esperado, a camada de serapilheira depositada no solo é uma das principais via de transferência de nutrientes para o solo a partir da matéria orgânica, promovendo o aumento da fertilidade do solo, além de atuar como isolante térmico, retenção de água e atenuar nos efeitos erosivos do solo (Silva et al., 2018). Ainda, a serapilheira atua como sumidouro de carbono, além de impactar respostas e feedbacks dos ecossistemas terrestres aos sistemas climáticos (Zhang et al., 2014).

Dentre as frações que compõem a serapilheira a fração foliar é responsável por cerca de 64% a 73% entre os ecossistemas florestais (Zhang et al., 2014; Queiroz et al., 2019; Marod et al., 2023). Neste sentido, a fração foliar neste estudo representou 61% da serapilheira total, com variações ao longo dos anos. A maior contribuição do tecido foliar na deposição total de serapilheira em florestas secas, pode ser atribuído aos mecanismos fisiológicos e ecológicos adotado pelas espécies vegetais como adaptação as condições de seca (Chave et al., 2010; Zhu et al., 2019, 2021) considerando que os maiores picos de deposição foram registrados durante a estação seca. Além disso, as maiores concentrações de nutrientes são encontradas no tecido foliar, já que as folhas são fisiologicamente mais ativas quando comparadas aos outros órgãos e apresentam maior taxa de decomposição em função da alta superfície específica (Souza et al., 2023).

Assim, observa-se que em florestas secas a deposição de serapilheira é marcada pela sazonalidade, de modo que, maior parte da deposição total ocorre durante a estação seca, visto que a Caatinga é composta principalmente por espécies decíduas que perdem suas folhas durante a transição da estação chuvosa para seca. Os maiores picos de queda foram registrados durante a transição do inverno para o outono. Assim, a partir deste

estudo percebe-se que na Caatinga a maior produção de serapilheira ocorre nos meses com menor incidência de radiação solar que corresponde as estações de inverno e outono (Queiroz et al., 2019). De modo semelhante, Araújo et al. (2019) também observaram maiores taxas de produção durante os meses de julho a agosto, que equivalem ao período de inverno e outono. Assim, fica evidente que a Caatinga apresenta padrões sazonais de deposição, com os maiores picos sendo registrados durante as estações secas (Marod et al., 2023). Resultados semelhantes foram observados em uma floresta seca no oeste da Tailândia (Marod et al., 2023). Vários estudos apontam que o padrão de deposição da serapilheira podem ser unimodais, bimodais ou irregulares com a ocorrência de vários picos ao longo do ano (Zhang et al., 2014). Com exceção de 2022 em que foi registrado um padrão bimodal, os demais anos avaliados neste estudo apresentaram padrão unimodal com picos ocorrendo geralmente entre os meses de maio a julho.

4.2. Deposição de serapilheira em oito espécies da Caatinga

Percebe-se que além dos padrões sazonais, a deposição da serapilheira também flutua em função do tipo de espécies e a partir de suas características intrínsecas (Figura 5 e 6). De modo geral, a maior produção de serapilheira ocorreu nos anos em que havia maior disponibilidade de água no ambiente, principalmente em 2022 (Figura 6). Sabese que em condições de déficit hídrico as plantas da Caatinga perdem suas folhas como mecanismo adaptativo para evitar a perda de água via transpiração. No entanto, a vegetação da Caatinga é extremamente responsiva aos primeiros eventos de chuva, com o surgimento de novas folhas logo após o início da estação chuvosa (Lopes et al., 2015). A produção de serapilheira é totalmente dependente da disponibilidade de água no ambiente e da distribuição de chuvas, como foi observado por Araújo et al. (2019), que constataram que a chuva e a evapotranspiração foram correlacionadas com a produção de serapilheira na Caatinga.

Na Caatinga, a caducifólia não ocorre de forma homogênea em todas as espécies, de modo que, as plantas podem perder todas as folhas em um ano e em outro não e, em diferentes períodos (Amorim et al., 2009). Dentre as espécies estudadas, *A. pyrifolium* foi responsável pela maior contribuição foliar e total em todos os anos, exceto em 2019, onde a maior produção foi observada para *C. quercifolius*. Espécies como *A. pyrifolium* perdem suas folhas logo após a estação chuvosa e podem permanecer sem folhas entre quatro a seis meses (Amorim et al., 2009; Lopes et al., 2020), no entanto, como observado neste estudo *A. pyrifolium* apresentou queda foliar em todo o período

experimental, com maiores picos ocorrendo a partir de abril até outubro em alguns anos. Além disso, a emissão de folhas dessa espécie não acontece de imediato após os eventos de chuva, a qual consegue permanecer com folhas em maior parte do ano, evidenciando sua tolerância as condições de baixa disponibilidade hídrica no solo (Queiroz et al., 2019; Parente et al., 2012).

Espécies como *C. quercifolius*, *C. leptophloeos* e *C. blanchetianus* também apresentaram grandes deposições de folhas. O pico de queda foliar destas espécies ocorre principalmente ao final da estação chuvosa, se propagando durante toda a estação seca (Lima & Rodal, 2010). O pico de queda foliar da *C. quercifolius* tem duração de cinco a sete meses, com produção de folhas pequenas durante a estação seca com incremento em seu tamanho na estação chuvosa (Lima & Rodal, 2010; Lopes et al., 2021). Além disso, esta espécie apresenta em sua morfologia foliar a presença de acúleos no limbo e espinhos em suas nervuras, que contribuem para o incremento de matéria seca da fração foliar, além de ser uma das primeiras a perder suas folhas logo após a estação chuvosa (Drumond et al., 2007; Queiroz et al., 2019). Para *C. leptophloeos* a queda de folhas pode ocorrer completamente durante a estação seca (Brito et al., 2022), no entanto, a produção de novas folhas ocorre ao final da estação seca com produção contínua até a estação chuvosa (Silva et al., 2020).

Em *C. blanchetianus* a deposição foliar ocorre de forma ininterrupta, apresentando sazonalidade em função dos eventos de chuva, com maior deposição no início da estação seca, como estratégia para reduzir a perda d'água via transpiração (Barros & Soares, 2013; Alves et al., 2014). Estes mesmos autores relataram que a produção de serapilheira para *C. blanchetianus* em 12 meses foi equivalente a 1.207,91 kg ha⁻¹, sendo 79,78% composto pela fração foliar. Desta forma, evidencia-se que a deposição da fração de folhas por espécies da Caatinga são relacionadas a fatores como a deciduidade das espécies avaliadas e aos níveis de chuva, de modo que, a maior ocorrência de chuvas implica na maior produção de serapilheira foliar (Alves et al., 2014).

Para a produção de galhos, observa-se que a contribuição das espécies variou em função dos anos, com destaque para *S. brasiliensis*, *A. pyrifolium*, *C. blanchetianus*, *C. leptophloeos*, *C. pyramidale* e *C. quercifolius* (Figura 6). A deposição de galhos pelas espécies pode ser impulsionada a partir de processos fisiológicos, a exemplo da queda natural, como também ataques de insetos ou até mesmo pela ação mecânica do vento e

da chuva (Alves et al., 2014). Além disso, a queda de galhos pode ser associada as características das espécies, a exemplo de *C. leptophloeos* que apresenta maior diâmetro e a morfologia do seu caule bem característico, com cascas que se desprendem do caule em lâminas revolutas e irregulares (Queiroz et al., 2019). Os picos de produção de galhos coincidiram com os meses que obtiveram maiores acúmulos de chuva (Figura 3A, C), sendo indicativo da relação entre os picos de queda e a estação chuvosa a partir da ação mecânica da chuva sobre os galhos mortos.

661

662

663

664

665

666

667

668

669

670

671

672

673

674

675

676

677

678

679

680

681

682

683

684

685

686

687

688

689

690

691

692

693

As espécies que apresentaram maior deposição de estruturas reprodutivas foram C. quercifolius, C. pyramidale, S. brasiliensis e C. blanchetianus (Figura 6). De modo semelhante a fração de galhos, a deposição de estruturas reprodutivas esteve associada aos eventos de chuva, uma vez que a maioria das espécies apresentaram pico de produção destas estruturas durante a estação chuvosa (Lima & Rodal, 2010). A maioria das espécies da Caatinga, apresentam florescimento anual, com picos ocorrendo de janeiro a maio a depender da espécie (Leite & Machado, 2010). A produção de estruturas reprodutivas em C. leptophloeos ocorre ainda durante a estação seca com o surgimento de pequenas flores que podem ser agrupadas ou isoladas com posterior frutificação entre a transição da estação chuvosa para seca, com a presença de frutos globulosos (Lima et al., 2012). O florescimento e a frutificação de C. quercifolius ocorre durante o verão, com flores compostas por pequenos cachos axilares e terminais, sendo seus frutos capsulas arredondadas que contribuem para o incremento de matéria seca na fração de estruturas reprodutivas (Drumond et al., 2007). A intensidade reprodutiva de S. brasiliensis ocorre durante a estação seca, quando a ocorrência de eventos de chuva é menor. C. pyramidale por sua vez, é amplamente distribuída na Caatinga, pertencendo a uma das principais famílias de leguminosas, de modo que, seu período de floração e frutificação ocorre logo em seguida ao início da estação chuvosa (Matos et al., 2019). De modo geral, percebe-se que o período em que há maior deposição de estruturas reprodutivas para as espécies estudadas ocorreu entre janeiro a abril quando há maior concentração de picos de chuva. Além disso, a literatura destaca que o período de floração e frutificação em espécies da Caatinga pode ocorrer ainda na estação seca a partir de eventos isolados de chuva e durante a estação chuvosa, visto a maior disponibilidade de água no ambiente (Matos et al., 2019).

Para a fração de miscelânea, as maiores contribuições foram observadas em *A. pyrifolium, C. leptophloeos* e *M. urundeuva*. No entanto, a fração de miscelânea é

composta essencialmente por dejetos animais, como restos de insetos e fezes (González-Rodríguez et al., 2011; Queiroz et al., 2019). Este componente deve-se a ação herbívora destes animais na vegetação. Além disso, percebe-se que a maior contribuição desta fração está associada ao surgimento de novas folhas e, consequentemente, menor deposição foliar.

4.3. Deposição de serapilheira e condições ambientais

A deposição de serapilheira responde a sazonalidade das condições microclimáticas do ambiente, a partir das respostas fenológicas como senescência foliar, surgimento de novas folhas, floração e frutificação (Lawrence, 2005; Zhou et al., 2015; Jia et al., 2020; Liu et al., 2024). Além disso, a influência das condições climáticas é dependente do componente da serapilheira (Sun et al., 2021). Assim, durante os períodos em que há diminuição da disponibilidade de água no solo em função da ausência de eventos de chuva, ocorre o aumento dos níveis de ácido abscísico nas folhas provocando o fechamento estomático, que irá resultar na queda deste material em maior pela ação do etileno (Liu et al., 2024), em espécies como *C. pyramidale, C. blanchetianus, A. pyrifolium* e *C. leptophloeos.* A deposição das folhas foi negativamente correlacionada com a radiação líquida (Rn), temperatura do dossel (Td), temperatura do solo (Tsolo), umidade volumétrica do solo (θsolo) e a radiação solar global (Rg) e positivamente correlacionada com a velocidade do vento (WS) (Tabela 5).

Como esperado, a maior deposição do tecido foliar ocorre durante a estação seca, quando as condições são limitantes para os processos metabólicos das plantas, principalmente, a fotossíntese; com maiores picos observados entre os meses de maio a julho. Nestes meses, a Caatinga encontra-se em transição entre as estações de inverno e outono, quando os níveis de incidência de radiação são menores e, consequentemente, há redução para Rn, Td e Tsolo (Queiroz et al., 2019). Em outros estudos na Caatinga, a deposição foliar foi melhor explicada pela chuva e evapotranspiração (Araújo et al., 2020). Em seu trabalho de revisão, Zhang et al. (2014) afirmaram que a chuva e a radiação solar são fatores limitantes na regulação da produção de serapilheira em florestas tropicais. De modo que, a deposição de folhas senescentes e o não surgimento de folhas novas ocorrem quando há abundância na incidência de radiação solar (Queiroz et al., 2019). Por outro lado, a velocidade do vento (VV) promove aumento na queda das folhas, além de diminuir a umidade relativa do ar e aumentar a dessecação do solo (Morffi-Mestre et al., 2020; Marod et al., 2023; Liu et al., 2024). Além disso, a velocidade do

vento pode promover a queda de folhas não maduras fisiologicamente (Wang et al., 2013; Zhou et al., 2015; Liu et al., 2024). Em outras florestas secas, a deposição de folhas também foi positivamente correlacionada com a velocidade do vento (Morffi-Mestre et al., 2020).

A fração de galhos e estruturas reprodutivas foram negativamente correlacionadas com a VV, Tsolo e positivamente com a θsolo (Tabela 6). A fração da serapilheira de galhos e estruturas reprodutivas não apresentaram um padrão claro, com picos de queda durante a primavera, verão e inverno. Percebe-se que os meses com maiores quedas destas frações coincide com os meses de menor queda foliar e com maiores eventos de chuva que culminam em maior disponibilidade de água no ambiente o que explica o aumento para a umidade volumétrica do solo e redução na temperatura do solo e velocidade do vento. Tais resultados demostram que durante os meses em que há presença de folhas, com o dossel da vegetação formado, há maior queda de estruturas reprodutivas e galhos (Figura 4 e 5). Além disso, o período de floração e frutificação das espécies da Caatinga ocorre após os primeiros eventos de chuva (Andrade et al., 2008; Parente et al., 2012; Queiroz et al., 2019), como estratégia de proliferação da espécie. Qiu et al. (2023) também observaram que a deposição das frações de galhos e folhas foram positivamente correlacionadas com a velocidade do vento.

4.4. Taxa de decomposição e retorno de nutrientes da serapilheira

Dentro dos ecossistemas florestais, a decomposição da serapilheira atua na liberação de nutrientes, a qual pode ser influenciada por fatores bióticos e abióticos, além de fornecer energia para os organismos heterotróficos e ser extremamente importante para a recuperação de ambientes degradados (Silva et al., 2018; Queiroz et al., 2019; Zhu et al., 2022). Os valores de decomposição k variaram de 0,14 a 3,99 neste estudo (Tabela 8), permanecendo dentro do esperado para florestas tropicais (0,3 a 4,0). Além disso, o tempo médio de residência desse material foi de 0,62 anos. Este valor foi inferior a outros estudos realizados na Caatinga (3,0) (Queiroz et al., 2019), sugerindo que neste estudo a decomposição ocorreu de forma mais rápida (Zhu et al., 2021) e tempo de desaparecimento de 50% e 95% para a serapilheira de 0,43 e 1,87 anos, respectivamente. O k médio foi de 1,60 para a Caatinga, sendo maior ao observado por Queiroz et al. (2019), que foi de 0,33, indicando que a decomposição ocorreu de forma relativamente alta. Sabe-se que o aumento da atividade microbiana está associado as condições microambientais adequadas, como por exemplo, maior disponibilidade de água no solo e

nutrientes, que são fatores que tendem a aumentar o processo de decomposição da matéria orgânica presente no solo (Zhu et al., 2022).

Além disso, durante os cinco anos avaliados choveu em média 601 mm ano⁻¹, cerca de 112 mm acima da normal climatológica para a região (489 mm ano⁻¹). Em outros tipos florestais a taxa de decomposição é superior a Caatinga, a exemplo de Zhu et al. (2019) avaliando florestas tropicais primárias, secundárias, antropogênicas e de monocultura de seringueira na China. Eles observaram uma taxa de decomposição que variou de 3,1 a 7,3, com média de 4,8. Desta forma, sugere-se que o clima é um fator determinante, o qual regula o processo de decomposição, de modo que, a chuva, particularmente, pode promover o aumento da decomposição em florestas tropicais (Latter et al., 1997; Zhu et al., 2019). Além disso, dentre os anos avaliados, 2020 foi o que apresentou maior taxa de decomposição (3,99) com uma chuva de 658,2 mm ano⁻¹, temperatura média do ar e do solo de 26 °C e 30 °C, respectivamente.

As maiores taxas de decomposição durante a estação chuvosa podem ser associadas aos efeitos combinados no aumento das condições ambientais (i.e., chuva, temperatura do ar e umidade relativa) (Pandey et al., 2007), em contrapartida a menor taxa de decomposição foi observada em 2018 (0,14), o que culminou com a menor chuva (427,9 mm ano⁻¹), seguida por 2022 com 0,19. Embora 2022 tenha apresentado maior chuva (755,4 mm), a temperatura média do ar (25,5 °C) e do solo (29,2 °C) foram menores em relação aos anos anteriores. Nestas condições, a baixa temperatura do ar diminui o processo de decomposição da serapilheira em virtude do retardo na atividade dos microrganismos presentes no solo (Pandey et al., 2007).

4.5. Eficiência do uso e retorno de nutrientes

A entrada de nutrientes nos ecossistemas florestais pode ocorrer a partir da deposição da serapilheira, da queda e do fluxo do tronco; no entanto, a maior quantidade de nutrientes entra via serapilheira com transferência significativa para o carbono e elementos minerais (Hansen et al., 2009; Sayer, 2006; Zhu et al., 2022). Contudo, o retorno destes nutrientes a partir da serapilheira dependem da quantidade e qualidade deste material (Hansen et al., 2009; Zhou et al., 2016). As concentrações de nutriente esteve de acordo com as flutuações na deposição de serapilheira, com maiores concentrações registradas em 2022, principalmente para os macronutrientes de Ca, N e K. No entanto, os valores foram inferiores aos reportados em outros estudos realizados

na Caatinga (Queiroz et al., 2019), em diferentes estágios de sucessão (Moura et al., 2016) e em florestas tropicais de várzea (Dent et al., 2006). Este comportamento pode ser associado à baixa produção de serapilheira observada na Caatinga e, consequentemente, a baixa concentração de nutrientes (Queiroz et al., 2019).

De modo semelhante, o maior retorno de nutrientes coincidiu com a maior deposição anual de serapilheira (Tang et al., 2010; Zhu et al., 2021, 2022), principalmente para o Ca, K e N. O Ca foi o macronutriente que apresentou maior retorno (56,55 kg ha⁻¹ ano⁻¹) da serapilheira para o solo, o que pode ser associado a sua maior concentração tanto no material presente no solo, como também na serapilheira suspensa, além do Ca ser um macronutriente estrutural presente na lamela média das células vegetais (Zhu et al., 2022). Por outro lado, a eficiência no uso do nutriente é dependente do elemento e do tipo de vegetação (Zhu et al., 2021; Tang et al., 2010) e, espera-se que esta seja maior em vegetações situadas em solos escassos em nutrientes (Kotowska et al., 2015; Zhu et al., 2022). A maior EUN foi observada para P, Mg e K. Em outros tipos de formação florestal (i.e., floresta seca e secundária) resultados semelhantes foram observados, com maior EUN para os mesmos nutrientes (Tang et al., 2010). A eficiência de uso de nutrientes para o P neste estudo, foi relativamente alta, sugerindo que o crescimento da vegetação é limitado pela escassez de P (Kotowska et al., 2015; Zhu et al., 2022) (Kotowska et al., 2016; Zhu et a., 2022). Para a Caatinga, Alves et al. (2017) constataram maior EUN para o S (enxofre), seguido por Mg, P, K, Ca e N, diferindo dos resultados encontrados neste estudo.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo, avaliamos a sazonalidade da deposição da serapilheira, sua decomposição e a relação com as variáveis meteorológicas. A produção de serapilheira exibiu um padrão sazonal unimodal, com maior deposição durante a estação seca e para os anos em que houve maior chuva acumulada, com maiores contribuições do tecido foliar que foi negativamente afetado pela radiação solar global, radiação líquida, temperatura do dossel e temperatura do solo, e positivamente pela velocidade do vento. Os picos de produção coincidiram com a transição do inverno para o outono, quando há diminuição dos eventos de chuva e, consequentemente, da umidade do solo. A produção de serapilheira pelas espécies não é de caráter homogêneo, visto que a deciduidade foliar variou em função da espécie, no entanto, *A. pyrifolium, C. quercifolius, C. leptophloeos* e *C. blanchetianus* foram as espécies com maior deposição de serapilheira na Caatinga.

- 825 Além disso, a dinâmica de decomposição está altamente associada as condições
- 826 climáticas e disponibilidade de água no solo, de modo que, as maiores taxas de
- 827 decomposição foram observadas em anos com maior chuva e temperatura do ar. Outro
- fator, é que a dinâmica de retorno de nutrientes é equivalente a produção de serapilheira,
- com maior retorno de nutrientes para Ca, K e N e maior EUN para os macronutrientes P,
- 830 Mg e K. Assim, a produção de serapilheira atua no funcionamento dos ecossistemas
- 831 secos, como fonte de nutrientes que serão mineralizados e posteriormente transferidos
- para o solo, além de atuar como barreira física protegendo o solo dos impactos
- 833 ocasionados pelas condições ambientais (i.e., chuva, radiação solar).

6. REFERÊNCIAS

834

- Alberton, B., Martin, T. C. M., Da Rocha, H. R., Richardson, A. D., Moura, M. S. B.,
- Torres, R. S., & Morellato, L. P. C. (2023). Relationship between tropical leaf
- phenology and ecosystem productivity using phenocameras. Frontiers in
- 838 Environmental Science, 11, 1223219.
- https://doi.org/10.3389/FENVS.2023.1223219/BIBTEX
- Alberton, B., Torres, R. da S., Silva, T. S. F., da Rocha, H. R., Moura, M. S. B., &
- Morellato, L. P. C. (2019). Leafing Patterns and Drivers across Seasonally Dry
- 842 Tropical Communities. *Remote Sensing 2019, Vol. 11, Page 2267, 11*(19), 2267.
- 843 https://doi.org/10.3390/RS11192267
- Alves, A. R., Ferreira, R. L. C., Da Silva, J. A. A., Dubeux Júnior, J. C. B., Osajima, J.
- A., & De Holanda, A. C. (2017). CONTEÚDO DE NUTRIENTES NA
- 846 BIOMASSA E EFICIÊNCIA NUTRICIONAL EM ESPÉCIES DA CAATINGA.
- 847 *Ciência Florestal*, 27(2), 377–390. https://doi.org/10.5902/1980509827686
- Alves, G. S., Mayra, G. F., Luana Régia Martins, A. A., da SSousa, J., & Silva Souto, J.
- 849 (2014). Contribuição do Croton blanchetianus Baill na produção de serrapilheira e
- ciclagem de nutrientes em área do Seridó da Paraíba Contribution Croton
- blanchetianus Baill in litterfall and nutrient cycling in the area Seridó of Paraíba.
- 852 *Revista Verde*, *3*, 50–57.
- Amorim, I. L. de, Sampaio, E. V. de S. B., & Araújo, E. de L. (2009). Fenologia de
- espécies lenhosas da caatinga do Seridó, RN. *Revista Árvore*, 33(3), 491–499.
- https://doi.org/10.1590/S0100-67622009000300011
- Amorim, L. B., Salcedo, I. H., Pareyn, F. G. C., & Alvarez, I. A. (2014). Assessment of

- nutrient returns in a tropical dry forest after clear-cut without burning. *Nutrient*
- 858 *Cycling in Agroecosystems*, 100(3), 333–343. https://doi.org/10.1007/S10705-014-
- 859 9646-5/TABLES/5
- 860 Andrade, R. L. de, Souto, S., Souto, C., & Bezerra, M. (2008). Deposição de
- serrapilheira em área de caatinga na RPPN" fazenda tamanduá", Santa Terezinha-
- 862 PB. Revista Caatinga, 21(2), 223–230.
- 863 https://www.redalyc.org/pdf/2371/237117611028.pdf
- Arato, H. D., Martins, S. V., & Ferrari, S. H. de S. (2003). Produção e decomposição de
- serapilheira em um sistema agroflorestal implantado para recuperação de área
- degradada em Viçosa-MG. *Revista Árvore*, 27(5), 715–721.
- 867 https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000500014
- 868 Araújo, V. F. P., Barbosa, M. R. V., Araújo, J. P., & Vasconcellos, A. (2019a). Spatial-
- temporal variation in litterfall in seasonally dry tropical forests in Northeastern
- 870 Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 80(2), 273–284. https://doi.org/10.1590/1519-
- 871 6984.192113
- 872 Araújo, V. F. P., Barbosa, M. R. V., Araújo, J. P., & Vasconcellos, A. (2019b). Spatial-
- temporal variation in litterfall in seasonally dry tropical forests in Northeastern
- 874 Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 80(2), 273–284. https://doi.org/10.1590/1519-
- 875 6984.192113
- Asigbaase, M., Dawoe, E., Lomax, B. H., & Sjogersten, S. (2021). Temporal changes in
- litterfall and potential nutrient return in cocoa agroforestry systems under organic
- and conventional management, Ghana. *Heliyon*, 7(10), e08051.
- 879 https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E08051
- Barros, I. O., & Soares, A. A. (2013). Adaptações anatômicas em folhas de marmeleiro
- e velame da caatinga brasileira. *Revista Ciência Agronômica*, 44(1), 192–198.
- https://doi.org/10.1590/s1806-66902013000100024
- Becker, J., Pabst, H., Mnyonga, J., & Kuzyakov, Y. (2015). Annual litterfall dynamics
- and nutrient deposition depending on elevation and land use at Mt. Kilimanjaro.
- Biogeosciences, 12(19), 5635–5646. https://doi.org/10.5194/BG-12-5635-2015
- Bezerra-Gusmão, M. A., Barbosa, J. R. C., Barbosa, M. R. de V., Bandeira, A. G., &
- Sampaio, E. V. S. B. (2011). Are nests of Constrictotermes cyphergaster (Isoptera,

- Termitidae) important in the C cycle in the driest area of semiarid caatinga in
- 889 northeast Brazil? *Applied Soil Ecology*, 47(1), 1–5.
- 890 https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2010.11.003
- 891 Brito, N. D. da S., Medeiros, M. J. dos S., Souza, E. S. de, & Lima, A. L. A. de. (2022).
- Drought response strategies for deciduous species in the semiarid Caatinga derived
- from the interdependence of anatomical, phenological and bio-hydraulic attributes.
- 894 Flora, 288, 152009. https://doi.org/10.1016/J.FLORA.2022.152009
- Chave, J., Navarrete, D., Almeida, S., Álvarez, E., Aragão, L. E. O. C., Bonal, D.,
- Châtelet, P., Silva-Espejo, J. E., Goret, J. Y., Von Hildebrand, P., Jiménez, E.,
- Patiño, S., Peñuela, M. C., Phillips, O. L., Stevenson, P., & Malhi, Y. (2010).
- Regional and seasonal patterns of litterfall in tropical South America.
- 899 *Biogeosciences*, 7(1), 43–55. https://doi.org/10.5194/BG-7-43-2010
- 900 Correia, G. G. de S., Martins, S. V., Neto, A. M., & Silva, K. de A. (2016). ESTOQUE
- 901 DE SERAPILHEIRA EM FLORESTA EM RESTAURAÇÃO E EM FLORESTA
- 902 ATLÂNTICA DE TABULEIRO NO SUDESTE BRASILEIRO¹. Revista Árvore,
- 903 40(1), 13–20. https://doi.org/10.1590/0100-67622016000100002
- Dent, D. H., Bagchi, R., Robinson, D., Majalap-Lee, N., & Burslem, D. F. R. P. (2006).
- Nutrient fluxes via litterfall and leaf litter decomposition vary across a gradient of
- soil nutrient supply in a lowland tropical rain forest. *Plant and Soil*, 288(1–2),
- 907 197–215. https://doi.org/10.1007/S11104-006-9108-1/TABLES/7
- 908 Drumond, M. A., Salviano, L. M. C., Cavalcanti, N. B., & Pereira, L. G. R. (2007).
- Produção, distribuição da biomassa e composição bromatológica da parte aérea da
- 910 faveleira. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, 2(4), 308–310.
- 911 https://doi.org/10.5039/agraria.v2i4a1852
- 912 González-Rodríguez, H., Domínguez-Gómez, T. G., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M.
- 913 V., Ramírez-Lozano, R. G., Pando-Moreno, M., & Fernández, C. J. (2011).
- Litterfall deposition and leaf litter nutrient return in different locations at
- 915 Northeastern Mexico. *Plant Ecology*, 212(10), 1747–1757.
- 916 https://doi.org/10.1007/S11258-011-9952-9/FIGURES/6
- 917 Gutman, G., & Ignatov, A. (1998). The derivation of the green vegetation fraction from
- NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models.
- 919 International Journal of Remote Sensing, 19(8), 1533–1543.

- 920 https://doi.org/10.1080/014311698215333
- Hansen, K., Vesterdal, L., Schmidt, I. K., Gundersen, P., Sevel, L., Bastrup-Birk, A.,
- Pedersen, L. B., & Bille-Hansen, J. (2009). Litterfall and nutrient return in five tree
- species in a common garden experiment. Forest Ecology and Management,
- 924 257(10), 2133–2144. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2009.02.021
- 925 Jardim, A. M. da R. F., Araújo Júnior, G. D. N., da Silva, M. V., Dos Santos, A., da
- 926 Silva, J. L. B., Pandorfi, H., de Oliveira-Júnior, J. F., Teixeira, A. H. de C.,
- Teodoro, P. E., de Lima, J. L. M. P., da Silva Junior, C. A., de Souza, L. S. B.,
- 928 Silva, E. A., & da Silva, T. G. F. (2022). Using Remote Sensing to Quantify the
- Joint Effects of Climate and Land Use/Land Cover Changes on the Caatinga
- Biome of Northeast Brazilian. *Remote Sensing*, 14(8), 1911.
- 931 https://doi.org/10.3390/RS14081911/S1
- Jardim, A. M. da R. F., Morais, J. E. F. de, Souza, L. S. B. de, Marin, F. R., Moura, M.
- 933 S. B. de, Morellato, L. P. C., Montenegro, A. A. de A., Ometto, J. P. H. B., de
- 934 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*
- 937 *Hydrology*, 625, 130121. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2023.130121
- Jia, B., Sun, H., Yu, W., & Zhou, G. (2020). Quantifying the interannual litterfall
- variations in China's forest ecosystems. *Journal of Plant Ecology*, 13(3), 266–272.
- 940 https://doi.org/10.1093/JPE/RTAA010
- Kotowska, M. M., Leuschner, C., Triadiati, T., & Hertel, D. (2015). Conversion of
- tropical lowland forest reduces nutrient return through litterfall, and alters nutrient
- use efficiency and seasonality of net primary production. *Oecologia 2015 180:2*,
- 944 180(2), 601–618. https://doi.org/10.1007/S00442-015-3481-5
- Latter, P. M., Howson, G., Howard, D. M., & Scott, W. A. (1997). Long-term study of
- litter decomposition on a Pennine peat bog: Which regression? *Oecologia*, 113(1),
- 947 94–103. https://doi.org/10.1007/S004420050357/METRICS
- 948 Lawrence, D. (2005). Regional-Scale Variation in Litter Production and Seasonality in
- Tropical Dry Forests of Southern Mexico 1. *Biotropica*, 37(4), 561–570.
- 950 https://doi.org/10.1111/J.1744-7429.2005.00073.X

- 951 Leite, A. V. de L., & Machado, I. C. (2010). Reproductive biology of woody species in
- Caatinga, a dry forest of northeastern Brazil. *Journal of Arid Environments*,
- 953 74(11), 1374–1380. https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2010.05.029
- 954 Liao, J. H., Wang, H. H., Tsai, C. C., & Hseu, Z. Y. (2006). Litter production,
- decomposition and nutrient return of uplifted coral reef tropical forest. Forest
- 956 *Ecology and Management*, 235(1–3), 174–185.
- 957 https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2006.08.010
- Lima, André Luiz Alves, de Sá Barretto Sampaio, E. V., de Castro, C. C., Rodal, M. J.
- N., Antonino, A. C. D., & de Melo, A. L. (2012). Do the phenology and functional
- stem attributes of woody species allow for the identification of functional groups in
- 961 the semiarid region of Brazil? *Trees Structure and Function*, 26(5), 1605–1616.
- 962 https://doi.org/10.1007/S00468-012-0735-2
- Lima, A. L. A., & Rodal, M. J. N. (2010). Phenology and wood density of plants
- growing in the semi-arid region of northeastern Brazil. *Journal of Arid*
- 965 Environments, 74(11), 1363–1373.
- 966 https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2010.05.009
- 967 Liu, X., Feng, Y., Zhao, X., Cui, Z., Liu, P., Chen, X., Zhang, Q., & Liu, J. (2024).
- Climatic drivers of litterfall production and its components in two subtropical
- forests in South China: A 14-year observation. Agricultural and Forest
- 970 *Meteorology*, 344, 109798. https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2023.109798
- 971 Lopes, D. C., Steidle Neto, A. J., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Zolnier, S., & Souza,
- 972 C. A. A. (2021). Simulating Rainfall Interception by Caatinga Vegetation Using
- 973 the Gash Model Parametrized on Daily and Seasonal Bases. Water 2021, Vol. 13,
- 974 *Page 2494, 13*(18), 2494. https://doi.org/10.3390/W13182494
- 975 Lopes, D. de C., Steidle Neto, A. J., Queiroz, M. G. de, Souza, L. S. B. de, Zolnier, S.,
- 8 Silva, T. G. F. da. (2020). Sparse Gash model applied to seasonal dry tropical
- 977 forest. *Journal of Hydrology*, *590*, 125497.
- 978 https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.125497
- 979 Lopes, M. C. A., Araújo, V. F. P., & Vasconcellos, A. (2015). The effects of rainfall
- and vegetation on litterfall production in the semiarid region of northeastern Brazil.
- 981 Brazilian Journal of Biology, 75(3), 703–708. https://doi.org/10.1590/1519-
- 982 6984.21613

983	Loupassaki, M. H., Chartzoulakis, K. S., Digalaki, N. B., & Androulakis, I. I. (2002).
984	Effects of salt stress on concentration of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium,
985	magnesium, and sodium in leaves, shoots, and roots of six olive cultivars. Journal
986	of Plant Nutrition, 25(11), 2457–2482. https://doi.org/10.1081/PLN-120014707
987	Marod, D., Nakashizuka, T., Saitoh, T., Hirai, K., Thinkampheang, S., Asanok, L.,
988	Phumphuang, W., Danrad, N., & Pattanakiat, S. (2023). Long Term Seasonal
989	Variability on Litterfall in Tropical Dry Forests, Western Thailand. Forests,
990	14(10), 2107. https://doi.org/10.3390/F14102107/S1
991	Matos, S. S. de, Melo, A. L. de, & Santos-Silva, J. (2019). Caesalpinioideae e
992	Cercidoideae (Leguminosae) no Parque Estadual Mata da Pimenteira, Semiárido de
993	Pernambuco, Brasil. <i>Rodriguésia</i> , 70, e01842017. https://doi.org/10.1590/2175-
994	7860201970017
995	Menezes, R. S. C., Sampaio, E. V. S. B., Giongo, V., & Pérez-Marin, A. M. (2012).
996	Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. Brazilian
997	Journal of Biology, 72(3 SUPPL.), 643-653. https://doi.org/10.1590/S1519-
998	69842012000400004
999	Morffi-Mestre, H., Ángeles-Pérez, G., Powers, J. S., Andrade, J. L., Ruiz, A. H. H.,
1000	May-Pat, F., Chi-May, F., & Dupuy, J. M. (2020). Multiple Factors Influence
1001	Seasonal and Interannual Litterfall Production in a Tropical Dry Forest in Mexico.
1002	Forests 2020, Vol. 11, Page 1241, 11(12), 1241.
1003	https://doi.org/10.3390/F11121241
1004	Montgomery, D. C., Peck, E. A. & Vining, G. G. Introduction to Linear Regression
1005	Analysis (Wiley, 2021).
1006	Oliveira, U., Megali Amado, A., & Vasconcellos, A. (2019). Aerial plant biomass and
1007	litterfall as local determinants of leaf litter and fine root decomposition in a
1008	semiarid ecosystem of the Neotropical region. Arid Land Research and
1009	Management, 33(4), 375–387. https://doi.org/10.1080/15324982.2019.1573387
1010	Olson, J. S. (1963). Energy Storage and the Balance of Producers and Decomposers in
1011	Ecological Systems. Ecology, 44(2), 322–331. https://doi.org/10.2307/1932179
1012	Pandey, R. R., Sharma, G., Tripathi, S. K., & Singh, A. K. (2007). Litterfall, litter
1013	decomposition and nutrient dynamics in a subtropical natural oak forest and

- managed plantation in northeastern India. Forest Ecology and Management,
- 1015 240(1–3), 96–104. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2006.12.013
- 1016 Parente, H. N., de Andrade, A. P., da Silva, D. S., Santos, E. M., Araujo, K. D., &
- 1017 Parente, M. de O. M. (2012). Influência do pastejo e da chuva sobre a fenologia de
- quatro espécies em área de caatinga. *Revista Árvore*, 36(3), 411–421.
- 1019 https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000300003
- 1020 Pérez-Suárez, M., Arredondo-Moreno, J. T., Huber-Sannwald, E., & Vargas-Hernández,
- J. J. (2009). Production and quality of senesced and green litterfall in a pine—oak
- forest in central-northwest Mexico. Forest Ecology and Management, 258(7),
- 1023 1307–1315. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2009.06.031
- 1024 Qiu, L., Xiao, T., Bai, T., Mo, X., Huang, J., Deng, W., & Liu, Y. (2023). Seasonal
- Dynamics and Influencing Factors of Litterfall Production and Carbon Input in
- Typical Forest Community Types in Lushan Mountain, China. Forests 2023, Vol.
- 1027 14, Page 341, 14(2), 341. https://doi.org/10.3390/F14020341
- 1028 Queiroz, M. G. de, da Silva, T. G. F., de Souza, C. A. A., da Rosa Ferraz Jardim, A. M.,
- do Nascimento Araújo, G., de Souza, L. S. B., & de Moura, M. S. B. (2020).
- 1030 Composition of Caatinga Species Under Anthropic Disturbance and Its Correlation
- With Rainfall Partitioning. *Floresta e Ambiente*, 28(1), e20190044.
- 1032 https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2019-0044
- 1033 Queiroz, M. G., da Silva, T. G. F., Zolnier, S., de Souza, C. A. A., de Souza, L. S. B.,
- do Nascimento Araújo, G., Jardim, A. M. da R. F., & de Moura, M. S. B. (2020).
- 1035 Partitioning of rainfall in a seasonal dry tropical forest. *Ecohydrology &*
- 1036 *Hydrobiology*, 20(2), 230–242. https://doi.org/10.1016/J.ECOHYD.2020.02.001
- 1037 Queiroz, M. G., da Silva, T. G. F., Zolnier, S., de Souza, C. A. A., de Souza, L. S. B.,
- Neto, S., de Araújo, G. G. L., & Ferreira, W. P. M. (2019). Seasonal patterns of
- deposition litterfall in a seasonal dry tropical forest. Agricultural and Forest
- 1040 *Meteorology*, 279, 107712. https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2019.107712
- 1041 Queiroz, M. G., da Silva, T. G. F., Zolnier, S., Jardim, A. M. da R. F., de Souza, C. A.
- 1042 A., Araújo Júnior, G. do N., de Morais, 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.
- 1045 https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2020.104457

- Rai, A., Singh, A. K., Ghosal, N., & Singh, N. (2016). Understanding the effectiveness
- of litter from tropical dry forests for the restoration of degraded lands. *Ecological*
- 1048 Engineering, 93, 76–81. https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2016.05.014
- Sayer, E. J. (2006). Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in
- the functioning of forest ecosystems. *Biological Reviews*, 81(1), 1–31.
- 1051 https://doi.org/10.1017/S1464793105006846
- Shen, G., Chen, D., Wu, Y., Liu, L., & Liu, C. (2019). Spatial patterns and estimates of
- global forest litterfall. *Ecosphere*, 10(2), e02587.
- 1054 https://doi.org/10.1002/ECS2.2587
- 1055 Silva, W. B., Périco, E., Dalzochio, M. S., Santos, M., & Cajaiba, R. L. (2018). Are
- litterfall and litter decomposition processes indicators of forest regeneration in the
- neotropics? Insights from a case study in the Brazilian Amazon. Forest Ecology
- and Management, 429, 189–197. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2018.07.020
- 1059 Silva, J. L. S. E., Cruz-Neto, O., Peres, C. A., Tabarelli, M., & Lopes, A. V. (2019).
- 1060 Climate change will reduce suitable Caatinga dry forest habitat for endemic plants
- with disproportionate impacts on specialized reproductive strategies. *PLoS ONE*,
- 1062 14(5), 1–25. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217028
- Silva, J. O., Espírito-Santo, M. M., Santos, J. C., & Rodrigues, P. M. S. (2020). Does
- leaf flushing in the dry season affect leaf traits and herbivory in a tropical dry
- 1065 forest? Science of Nature, 107(6), 1–10. https://doi.org/10.1007/S00114-020-
- 1066 01711-Z
- Song, W., Mu, X., Ruan, G., Gao, Z., Li, L., & Yan, G. (2017). Estimating fractional
- vegetation cover and the vegetation index of bare soil and highly dense vegetation
- with a physically based method. *International Journal of Applied Earth*
- 1070 *Observation and Geoinformation*, 58, 168–176.
- 1071 https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.01.015
- 1072 Song, W., Zhao, T., Mu, X., Zhong, B., Zhao, J., Yan, G., Wang, L., & Niu, Z. (2022).
- 1073 Using a Vegetation Index-Based Mixture Model to Estimate Fractional Vegetation
- 1074 Cover Products by Jointly Using Multiple Satellite Data: Method and Feasibility
- 1075 Analysis. In *Forests* (Vol. 13, Issue 5). https://doi.org/10.3390/f13050691
- 1076 Souza, R. C. de, Pereira, M. G., Machado, D. L., Toledo, L. de O., Menezes, C. E. G.,

- Santos, G. L. dos, Coutinho, F. S., Guareschi, R. F., & Mendonça, V. M. M.
- 1078 (2023). Nutrient cycling aspects as possible ecosystem functional indicators of
- successional stage in Semideciduous seasonal forest, Rio de Janeiro state, Brazil.
- 1080 *Acta Oecologica*, 121, 103951. https://doi.org/10.1016/J.ACTAO.2023.103951
- Souza, Saimo R., Veloso, M. D. M., Espírito-Santo, M. M., Silva, J. O., Sánchez-
- Azofeifa, A., Souza e Brito, B. G., & Fernandes, G. W. (2019). Litterfall dynamics
- along a successional gradient in a Brazilian tropical dry forest. Forest Ecosystems
- 1084 2019 6:1, 6(1), 1–12. https://doi.org/10.1186/S40663-019-0194-Y
- 1085 Sun, X., Liu, F., Zhang, Q., Li, Y., Zhang, L., Wang, J., Zhang, H., Wang, C., & Wang,
- 1086 X. (2021). Biotic and climatic controls on the interannual variation in canopy
- litterfall of a deciduous broad-leaved forest. Agricultural and Forest Meteorology,
- 307, 108483. https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2021.108483
- Tang, J. W., Cao, M., Zhang, J. H., & Li, M. H. (2010). Litterfall production,
- decomposition and nutrient use efficiency varies with tropical forest types in
- 1091 Xishuangbanna, SW China: A 10-year study. *Plant and Soil*, 335(1), 271–288.
- 1092 https://doi.org/10.1007/S11104-010-0414-2
- Tesfay, F., Kibret, K., Gebrekirstos, A., & Hadgu, K. M. (2020). Litterfall production
- and associated carbon and nitrogen flux along exclosure chronosequence at Kewet
- district, central lowland of Ethiopia. *Environmental Systems Research* 2020 9:1,
- 1096 9(1), 1–12. https://doi.org/10.1186/S40068-020-00172-7
- 1097 Vital, A. R. T., Guerrini, I. A., Franken, W. K., & Fonseca, R. C. B. (2004). Produção
- de serapilheira e ciclagem de nutrientes de uma floresta estacional semidecidual
- em zona ripária. *Revista Árvore*, 28(6), 793–800. https://doi.org/10.1590/S0100-
- 1100 67622004000600004
- 1101 Vitousek, P. (1982). Nutrient Cycling and Nutrient Use Efficiency.
- 1102 *Https://Doi.Org/10.1086/283931, 119*(4), 553–572. https://doi.org/10.1086/283931
- 1103 Wang, H. C., Wang, S. F., Lin, K. C., Lee Shaner, P. J., & Lin, T. C. (2013). Litterfall
- and Element Fluxes in a Natural Hardwood Forest and a Chinese-fir Plantation
- Experiencing Frequent Typhoon Disturbance in Central Taiwan. *Biotropica*, 45(5),
- 1106 541–548. https://doi.org/10.1111/BTP.12048
- Williams-Linera, G., Bonilla-Moheno, M., López-Barrera, F., & Tolome, J. (2021).

- Litterfall, vegetation structure and tree composition as indicators of functional
- recovery in passive and active tropical cloud forest restoration. Forest Ecology and
- 1110 *Management*, 493, 119260. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2021.119260
- 1111 Wu, J., Su, Y., Chen, X., Liu, L., Yang, X., Gong, F., Zhang, H., Xiong, X., & Zhang,
- D. (2021). Leaf shedding of Pan-Asian tropical evergreen forests depends on the
- synchrony of seasonal variations of rainfall and incoming solar radiation.
- 1114 Agricultural and Forest Meteorology, 311, 108691.
- 1115 https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2021.108691
- Zhang, H., Yuan, W., Dong, W., & Liu, S. (2014). Seasonal patterns of litterfall in
- forest ecosystem worldwide. *Ecological Complexity*, 20, 240–247.
- 1118 https://doi.org/10.1016/J.ECOCOM.2014.01.003
- 1119 Zhang, S., Chen, H., Fu, Y., Niu, H., Yang, Y., & Zhang, B. (2019). Fractional
- 1120 Vegetation Cover Estimation of Different Vegetation Types in the Qaidam Basin.
- In Sustainability (Vol. 11, Issue 3). https://doi.org/10.3390/su11030864
- 1122 Zhou, J., Lang, X., Du, B., Zhang, H., Liu, H., Zhang, Y., & Shang, L. (2016). Litterfall
- and nutrient return in moist evergreen broad-leaved primary forest and mixed
- subtropical secondary deciduous broad-leaved forest in China. European Journal
- of Forest Research, 135(1), 77–86. https://doi.org/10.1007/S10342-015-0918-7
- 1126 Zhou, L., Shalom, A. D. D., Wu, P., Li, S., Jia, Y., & Ma, X. (2015). Litterfall
- production and nutrient return in different-aged Chinese fir (Cunninghamia
- lanceolata) plantations in South China. Journal of Forestry Research, 26(1), 79–
- 89. https://doi.org/10.1007/S11676-014-0011-Y
- 1130 Zhu, X., Jiang, X., Kumar Singh, A., Zeng, H., Chen, C., Lu, E., & Liu, W. (2022).
- 1131 Reduced litterfall and decomposition alters nutrient cycling following conversion
- of tropical natural forests to rubber plantations. *Ecological Indicators*, 138,
- 1133 108819. https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2022.108819
- 1134 Zhu, X., Liu, W., Chen, H., Deng, Y., Chen, C., & Zeng, H. (2019). Effects of forest
- transition on litterfall, standing litter and related nutrient returns: Implications for
- forest management in tropical China. *Geoderma*, 333, 123–134.
- 1137 https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2018.07.023
- 1138 Zhu, X., Zou, X., Lu, E., Deng, Y., Luo, Y., Chen, H., & Liu, W. (2021). Litterfall

biomass and nutrient cycling in karst and nearby non-karst forests in tropical
China: A 10-year comparison. *Science of The Total Environment*, 758, 143619.
https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.143619

1142

1143

1144

1145

1146

1147

1148

1149

1150

1151

1152

1153

1154

1155

1156

1157

1158

1159

1160

1161

1162

1163

1164

1165

1166

1167

1168

1169

1170

1171

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, buscamos compreender quais as implicações da mudança no uso da terra sob o balanço de energia, seus componentes e a evapotranspiração, além da dinâmica de C e nutrientes em diferentes paisagens no semiárido brasileiro e as perdas inerentes da serapilheira e a ciclagem de nutrientes na Caatinga. Assim, observamos que a área desmatada apresentou menor R_n em função das características da superfície; de modo que maior parte da radiação líquida foi utilizada para o aquecimento do ar, pelo fluxo de calor sensível. A evapotranspiração foi menor durante a estação seca, em especial na área desmatada, sendo maior durante a estação chuvosa na área de Caatinga em regeneração. Além disso, os maiores acúmulos de C e nutrientes foram registrados durante a estação chuvosa, principalmente em áreas cobertas com clones de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana com capacidade de armazenamento de 58,9 Mg C ha⁻¹ e 0,4 Mg P ha⁻¹ ¹, enquanto ambientes com vegetação nativa de Caatinga preservada armazenaram 25,1 Mg C ha⁻¹. Por outro lado, a produção de serapilheira é maior durante a estação seca, com maior produção em anos com maior disponibilidade hídrica. A produção média de serapilheira da Caatinga é de 864,69 kg MS ha⁻¹ com padrão de deposição sazonal unimodal. A fração foliar é o componente que apresenta maior contribuição na serapilheira total, sendo negativamente correlacionada com a radiação solar global, radiação líquida, temperatura do dossel e temperatura do solo e positivamente com a velocidade do vento. Outro fator, é que a dinâmica de retorno de nutrientes é equivalente a produção de serapilheira, com maior retorno de nutrientes para Ca, K e N e maior EUN para os macronutrientes P, Mg e K. Assim, o presente estudo evidencia que a mudança no uso da terra promove alterações no balanço de energia, seus componentes, evapotranspiração e na dinâmica de C e nutrientes principalmente a partir da disponibilidade de água no ambiente, de modo que, a palma forrageira pode ser utilizada para remediação de áreas desmatadas a partir da sua capacidade de armazenar C; enquanto a remoção da vegetação nativa implica em perdas significativas de serapilheira que atua na proteção do solo dos impactos ocasionados pelas condições ambientais.