MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m12e/2025/07.04.03.07-TDI

ECOHIDROLOGIA DA CAATINGA: SAZONALIDADE DO FLUXO DE SEIVA E FONTES HÍDRICAS DE ESPÉCIES LENHOSAS

Dione Judite Ventura da Silva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelas Dras. Laura De Simone Borma, e Fernanda de Vasconcellos Barros, aprovada em 15 de maio de 2025.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD2USNRW34T/4DPUJPH>

INPE
São José dos Campos
2025

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dr. Thales Sehn Korting - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)

Dr. Heyder Hey - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m12e/2025/07.04.03.07-TDI

ECOHIDROLOGIA DA CAATINGA: SAZONALIDADE DO FLUXO DE SEIVA E FONTES HÍDRICAS DE ESPÉCIES LENHOSAS

Dione Judite Ventura da Silva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelas Dras. Laura De Simone Borma, e Fernanda de Vasconcellos Barros, aprovada em 15 de maio de 2025.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD2USNRW34T/4DPUJPH>

INPE
São José dos Campos
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Dione Judite Ventura da.

Si38e Ecohidrologia da Caatinga: sazonalidade do fluxo de seiva e fontes hídricas de espécies lenhosas / Dione Judite Ventura da Silva. – São José dos Campos : INPE, 2025.

xxvi + 79 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m12e/2025/07.04.03.07-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2025.

Orientadores : Dras. Laura De Simone Borma, e Fernanda de Vasconcellos Barros.

1. Isótopos estáveis da água. 2. Florestas tropicais sazonalmente secas. 3. Caatinga. 4. Estratégias de uso da água. 5. Ecohidrologia. I.Título.

CDU 556:574(81)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

Aluno (a): Dione Judite Ventura da Silva
Título: "Ecohidrologia da Caatinga: Sazonalidade do Fluxo de Seiva e Fontes Hídricas de Espécies Lenhosas".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título Doutor (a) em Ciência do Sistema Terrestre.

(assinado eletronicamente)
Dr. Manoel Ferreira Cardoso - Presidente - INPE
(x) Aprovado ( ) Reprovado

(assinado eletronicamente)
Dra. Laura De Simone Borma - Orientadora - INPE
(x) Aprovado ( ) Reprovado

(assinado eletronicamente)
Dra. Fernanda de Vasconcellos Barros - Orientadora - INPE
(x) Aprovado ( ) Reprovado

(assinado eletronicamente)
Dr. Bráulio Almeida Santos - Membro Externo - (UFPB)
(x) Aprovado ( ) Reprovado

(assinado eletronicamente)
Dra. Magna Soelma Beserra de Moura - Membro Externo - (Embrapa Agroindústria Tropical)
(x) Aprovado ( ) Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples
(x) unanimidade

São José dos Campos, 15 de maio de 2025

Documento assinado eletronicamente por **Magna soelma beserra de moura (E)**, **Usuário Externo**, em 16/05/2025, às 13:25 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Manoel Ferreira Cardoso**, **Pesquisador**, em 16/05/2025, às 13:50 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Fernanda de vasconcellos barros (E)**, **Usuário Externo**, em 19/05/2025, às 05:02 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Laura de Simone Borma**, **Pesquisador Titular**, em 30/05/2025, às 10:02 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.mcti.gov.br/verifica.html, informando o código verificador **12812884** e o código CRC **B3914FD6**.

Referência: Processo nº 01340.003305/2025-41 SEI nº 12812884

"A classe dominante não domina por ser mais culta, mas porque sonega conhecimento à classe dominada. Por isso nós, filhos da classe trabalhadora, temos que estudar, estudar e estudar. E se isso nos trouxer alguma ascensão, jamais devemos esquecer qual é a nossa classe – e lutar por ela".

Autor desconhecido

Eu quero dedicar este trabalho aos meus pais, meu tio Severino, meu irmão e todos os frutos que deles advieram, meus sobrinhos. Quero expressar aqui o quanto a fala da minha mãe até hoje ecoa em mim: “Estude, minha filha, pois o estudo, conhecimento e cultura sãs as únicas coisas na vida que ninguém pode lhe tirar”. Acreditei neste conselho e seguir. Obrigada, Mainha e Painho.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a todos que construíram comigo o sonho de um dia tornar o mundo melhor e mais humano. Talvez esse dia nunca chegue, mas viver essa utopia em conjunto é ter certeza dessa construção diária.

Aos meus ancestrais que, de alguma forma, fizeram a vida seguir no rumo certo - mesmo quando, às vezes, eu achava que tudo estava indo na contramão.

A Deus, pela força diária para enfrentar a dureza desta vida cotidiana.

Aos meus familiares, por todo o apoio de sempre, principalmente aos meus pais (Roselita e Pedro), meu irmão (Diógenes), meus sobrinhos (Lara e Benjamin) e Minha Vó (Carmelita). Não é fácil escolher estar longe, mas essa caminhada também é por vocês.

Ao meu companheiro Fábio Del Nero, por estar comigo durante todo o processo deste trabalho. Seu apoio, amor e parceria diária foram fundamentais para que eu chegasse a este momento. Obrigada!

A Celina Cândida, pela parceria, amizade e irmandade eterna. Sua trajetória me inspira.

Ao amigo que o INPE me deu, Miguelito Angel - você é verdadeiramente um anjo na minha vida. Obrigada!

Às minhas amigas Sueny, Raquel e Natália. A biologia me presenteou com essas amigas incríveis, que nunca soltaram minha mão.

Aos meus amigues Jana, Tati, Aline (Garça), Cris, Stela, Maria e Aruã, pelas energias positivas que compartilharam comigo neste percurso.

À minha amiga Neli, por anos de amizade que atravessam o tempo – desde outrora me fazendo rir e contagiando meus dias com seus causos mais que hilários

À minha orientadora Drª Laura Borma, por seus conhecimentos científicos e por seu coração enorme, sempre me acolhendo, apoiando e acreditando na minha formação.

À minha coorientadora Drª Fernanda Barros, por aceitar o convite para coorientar, por sempre estar disposta a sanar dúvidas e por enriquecer meus conhecimentos científicos.

Aos meus companheiros de laboratório e campo - Breno Pupin, Talita, Luciana, Fábio e Douglas - obrigada pela parceria. Agradecimento especial a Reinaldo Novo, Mauro Brum e Fernanda Barros, que transformaram as idas a campo em algo mais que científico. Obrigada pela amizade, carinho, risadas e conhecimentos compartilhados.

Aos colegas, professores e pesquisadores do curso de Pós-graduação em Ciências do Sistema Terrestre por todo aprendizado e compartilhamento de ideias novas.

À CAPES pela oportunidade dada e ter estudos no Brasil e no INPE.

A Daniel Meneghetti, por toda a ajuda e paciência nos trabalhos do laboratório.

Ao Joabe Santos, pela inestimável ajuda nos trabalhos de campo e nas coletas de dados. Muito obrigado por sua constante solicitude e paciência exemplar.

À Embrapa Semiárido e à Drª Magna Moura, pela cessão de dados essenciais e pela disponibilidade constante no apoio aos trabalhos de campo.

RESUMO

A origem da água utilizada pela vegetação durante a transpiração é um fator-chave para seu funcionamento ecofisiológico. Em regiões como a Caatinga, caracterizada por acentuada sazonalidade climática e irregularidade das chuvas, a disponibilidade hídrica do solo e o transporte de água pelas plantas são diretamente afetados. Diante desse contexto, o objetivo do estudo foi analisar como tais variações influenciam o uso de diferentes fontes hídricas e os fluxos de seiva em espécies lenhosas decíduas da Caatinga, em uma parcela permanente de 0,5 ha localizada na Estação Experimental da Embrapa Semiárido, em Pernambuco. Para a identificação das fontes hídricas, foram coletadas amostras de xilema de cinco espécies arbóreas, além de amostras de solo e de água da chuva, durante os períodos seco, intermediário e chuvoso. As análises isotópicas da água (δ^2H e $\delta^{18}O$) foram utilizadas para inferir as fontes utilizadas ao longo das estações. Paralelamente, o fluxo de seiva foi monitorado por meio do método de dissipação térmica (TDP) em quatro das cinco espécies estudadas. A umidade do solo foi monitorada com sensores de umidade volumétrica e de potencial mátrico instalados em cinco profundidades em um perfil de solo. Variáveis microclimáticas, como precipitação, umidade relativa do ar e evapotranspiração de referência, foram obtidas a partir de estação agrometeorológica próxima à área experimental. Os sinais isotópicos indicaram mudanças nas fontes de água utilizadas pelas plantas ao longo das estações. Durante o período chuvoso, a vegetação acessou a água do solo superficial e da chuva. Já na estação seca, os sinais isotópicos do xilema se desacoplaram das fontes superficiais, sugerindo o uso de fontes mais profundas ou alternativas. No monitoramento do fluxo de seiva, *Senegalia piauhiensis* e *Commiphora leptophloeos* mostraram-se mais sensíveis ao déficit de pressão de vapor (VPD), enquanto *Manihot carthagenensis* foi a espécie mais afetada pelo conteúdo de água e potencial mátrico do solo, apesar de apresentar fluxo mínimo durante a seca. *Cenostigma microphyllum* demonstrou maior estabilidade diante do estresse hídrico. Esses resultados revelam a complexidade da dinâmica hídrica na Caatinga, evidenciada pelas mudanças nas fontes de água utilizadas e pela variação no transporte de água em resposta às condições ambientais. Sob cenários de mudanças climáticas, com secas mais frequentes e intensas, essas limitações hídricas podem reduzir a transpiração e impactar os fluxos de carbono e energia do ecossistema. Compreender essas estratégias é fundamental para a conservação da funcionalidade ecológica da Caatinga frente às crescentes pressões ambientais.

Palavras-chave: Isótopos estáveis da água. Florestas tropicais sazonalmente secas. Caatinga. Estratégias de uso da água. Ecohidrologia. Fluxo de seiva.

ECOHYDROLOGY OF THE CAATINGA: SEASONALITY OF WATER SOURCES AND SAP FLOW OF WOODY SPECIES

ABSTRACT

The origin of water used by vegetation during transpiration is a key factor in its ecophysiological functioning. In regions such as the Caatinga, characterized by marked climatic seasonality and irregular rainfall, soil water availability and water transport by plants are directly affected. In this context, the objective of this study was to analyze how such variations influence the use of different water sources and sap flow in deciduous woody species of the Caatinga, within a 0.5 ha permanent plot located at the Embrapa Semiárido Experimental Station, in Pernambuco, Brazil.To identify water sources, xylem samples were collected from five tree species, along with soil and rainwater samples, during dry, transitional, and wet seasons. Water isotopic analyses (δ^2H and $\delta^{18}O$) were used to infer the sources accessed throughout the year. In parallel, sap flow was monitored using the thermal dissipation probe (TDP) method in four of the five species. Soil moisture was monitored using volumetric water content and soil matric potential sensors installed at five depths. Microclimatic variables, such as precipitation, relative humidity, and reference evapotranspiration, were obtained from a nearby agrometeorological station.Isotopic signals indicated seasonal changes in water sources used by the plants. During the wet season, vegetation accessed both rainwater and shallow soil water. In contrast, during the dry season, xylem water became decoupled from surface sources, suggesting uptake from deeper or alternative sources. In sap flow monitoring, *Senegalia piauhiensis* and *Commiphora leptophloeos* were more sensitive to vapor pressure deficit (VPD), while *Manihot carthagenensis* was most affected by soil moisture and matric potential, despite maintaining minimal flow. *Cenostigma microphyllum* exhibited greater stability under drought stress. These results highlight the complexity of water dynamics in the Caatinga, evidenced by shifts in water source usage and variation in water transport in response to environmental conditions. Under climate change scenarios, with increasingly frequent and intense droughts, water limitations may reduce transpiration and affect ecosystem-level carbon and energy fluxes. Understanding these ecohydrological strategies is essential for conserving the ecological functionality of the Caatinga in the face of growing environmental pressures.

Keywords: Stable water isotopes. Seasonally dry tropical forests. Plant water-use strategies. Caatinga. Ecohydrology. Sap flow.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 2.1 – Visão geral dos processos de fracionamento isotópico da água que ocorrem na interação solo - planta - atmosfera. O sinal de '+' indica um processo de fracionamento isotópico levando ao enriquecimento em isótopos pesados, o sinal de '-' representa depleção em isótopos pesados e o zero é um sinal de processos de não fracionamento. 15

Figura 4.1 – Localização da área de estudo, bioma Caatinga (Embrapa Semiárido), Petrolina - Pernambuco, Nordeste do Brasil. 20

Figura 5.1 – Precipitação acumulada (mm) ao longo dos meses, para os anos de 2019 (em vermelho), 2018 (em azul) e para o período de 1982 a 2017 (em cinza). A média de precipitação no período de 1982 a 2019 está representada pela linha preta., obtidos a partir dos registros da Estação Caatinga.....32

Figura 5.2 – Distribuição da precipitação média mensal (mm/mês) ao longo do ano, calculada com base nos totais mensais médios do período de 1982 a 2019, obtidos a partir dos registros da Estação Caatinga.. 32

Figura 5.3 – VPD e ET0 ao longo do tempo. Os valores de VPD e ET0 médios correspondem à média móvel dessas medidas, considerando-se um período de 5 dias.....33

Figura 5.4 – Valores de VPD e CAS ao longo do tempo. Os valores de VPD e CAS médios correspondem à média móvel dessas medidas, considerando-se um período de 5 dias. O sombreamento cinza claro indica o período seco (maio–outubro) 34

Figura 5.5 – CAS ao longo do tempo, colorido pelo PM médio do solo. Os valores de CAS correspondem à média móvel de cinco dias e o sombreamento cinza claro indica o período seco (maio–outubro). A cor dos marcadores representa o potencial matricial médio do perfil do solo (kPa)... 35

Figura 5.6 – Histogramas circulares das datas de transição (TDs) representando, (a) o início da estação foliar (SOS) e (b) o fim da estação foliar (EOS) para o sítio de Petrolina, calculados a partir da série temporal 2018 a 2019. DOY representa o ângulo médio convertido para o dia do ano (0 = janeiro; 180 = junho).....36

Figura 5.7 – Histogramas circulares por espécies das datas de transição (TDs) representando, (a - d) o início da estação foliar (SOS) e (e- h) o fim da estação foliar (EOS) entre as espécies para o sítio de Petrolina, calculados a partir da série temporal 2018 a 2019. DOY representa o ângulo médio convertido para o dia do ano (0 = janeiro; 180 = junho..... 38

Figura 5.8 – Duração média do estágio fenológico foliar (LOS) das espécies *Manihot carthagenensis, Cenostigma microphyllum, Commiphora leptophloeos e Sapium glandulosum* entre 2018 e 2019. Cada barra horizontal indica a média de LOS (em dias do ano) calculada a partir de 4 a 11 indivíduos por espécie. As barras de erro correspondem a ±1 desvio-padrão (SD)... 39

Figura 5.9 – Boxplots dos valores de (a) $\delta^{2}H$ e (b) $\delta^{18}O$ em todos os períodos (períodos úmidos, de transição e secos) das diferentes fontes de água: chuva, xilema de cinco espécies vegetais e solo em três profundidades. As caixas mostram a mediana (linha preta), os quartis (caixa), extremos (linhas) e outliers (pontos). A ordem vertical reflete o gradiente hidrológico: chuva no topo, seguida pelas espécies e solo ao final. 40

Figura 5.10 – Relação entre $\delta^{18}O$ (‰) e $\delta^{2}H$ (‰) de acordo com as fontes de água e gráficos boxplot para os valores de $\delta^{18}O$ (‰) e $\delta^{2}H$ (‰) de acordo com as fontes de água. Letras distintas indicam grupos que diferem estatisticamente entre si, de acordo com o post-hoc de Tukey. Dados referentes ao período chuvoso (a), de transição (b) e seco (c).....41

Figura 5.11- Gráfico de pontos com barras de erro para os valores de $\delta^{18}O$ (‰) de acordo com a espécie e a profundidade do solo. Os pontos representam as médias e as barras de erro indicam o desvio-padrão. A faixa cinza corresponde ao intervalo de média ± desvio-padrão para LMWL 45

Figura 5.12 - Gráfico de pontos com barras de erro para os valores de δ^2H (‰) de acordo com a espécie e a profundidade do solo. Os pontos representam as médias e as barras de erro indicam o desvio-padrão. A faixa cinza corresponde ao intervalo de média ± desvio-padrão para LMWL. 45
Figura 5.13 - Precipitação mensal (mm) e gráfico de linhas para os valores de FDN, de acordo com a espécie no período de mar/2018 a abril/2019. Sombreado cinza representa o período seco para a região.. 47
Figura 5.14 - Densidade de fluxo de seiva normalizado (FDN) por período (seco vs. chuvoso) para as espécies: (a) *Senegalia piauhiensis* (N = 260), (b) *Cenostigma microphyllum* (N = 280), (c) *Commiphora leptophloeos* (N = 163) e (d) *Manihot carthagenensis* (N = 305). As caixas representam os quartis (Q1, Q2 = mediana, Q3), e as barbelas indicam os valores extremos. Diferenças significativas entre os períodos foram avaliadas pelo teste de Mann-Whitney (* p < 0,05). 48
Figura 5.15 - Gráficos de dispersão para a relação entre FDN das diferentes espécies e VPD (Kpa) (a-d) e CAS (mm) (e-h). Os pontos azuis representam dados coletados no período chuvoso. Os pontos vermelhos indicam dados coletados no momento seco. As relações entre FDN e VPD são mais bem descritas por modelos lineares; as relações entre FDN e ACS são mais bem descritas por modelos não-lineares..... 50
Figura 5.16 - Gráficos de dispersão para a relação entre FDN médio (média de todas as espécies) e VPD (kPa) (a) e CAS (mm) (b). Os pontos azuis representam dados coletados no período chuvoso. Os pontos vermelhos indicam dados coletados no momento seco... 52
Figura 5.17 - Gráficos de dispersão para a relação entre o FDN de cada espécie e a média de PM de todas as profundidades. Os pontos azuis representam dados coletados no período chuvoso. Os pontos vermelhos indicam dados coletados no momento seco. Todas essas relações foram mais bem descritas por modelos lineares..... 53
Figura A.1 - Esquema metodológico integrado para avaliação ecohidrológica na área de estudo (Petrolina, PE) 78

Figura A.2 - Desenho esquemático relacionado *a variação sazonal do FDN, VPD e* eventos fenológicos (SOS/EOS) em espécies caducifólias da Caatinga. a) *S. piauhiensis*, b) *C. leptopholoeos* c) *C. microphyllum* d) *M. carthagenensis. 79*

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 2.1 - Características gerais das espécies estudadas no presente estudo.....11

Tabela 5.1 - Valores mínimos, máximos e médios (± desvio padrão) dos isótopos estáveis de hidrogênio (δ^2H) e oxigênio ($\delta^{18}O$) em diferentes fontes de água (chuva, solo e xilema) coletadas ao longo do período de estudo. Os valores representam a variação na composição isotópica da água associada a cada compartimento, com o número total de amostras (N) indicado para cada tipo de amostra. 40

Tabela 5.2 - Modelo linear geral com δ^2H (‰) como variável dependente e $\delta^{18}O$ (‰) e fontes de água como variáveis independentes. Dados referentes ao período seco, de transição e chuvoso.....42

Tabela 5.3 - Resultado das comparações entre pares com correção de Tukey para as médias de $\delta^{18}O$ (‰) de acordo com as fontes de água para os períodos seco, de transição e úmido..... 43

Tabela 5.4 - Resultado das comparações entre pares com correção de Tukey para as médias de δ^2H (‰) de acordo com as fontes de água para os períodos seco, de transição e úmido.....43

Tabela 5.5 - Resumo dos modelos entre FDN e VPD (modelos lineares) e entre FDN e ACS (modelos lineares e não-lineares), com os respectivos coeficientes e parâmetros ajustados por espécie 49

Tabela 5.6 - Resumo dos modelos entre FDN e VPD (modelos lineares) e entre FDN e ACS (modelos lineares e não-lineares), com os respectivos coeficientes e parâmetros ajustados por espécie. 51

Tabela A.1 - Inclinações das retas de acordo com as fontes de água. Dados referentes ao período seco, de transição e úmido.....77

Tabela A. 2 - Diferenças entre as inclinações das retas de diferentes fontes de água. Dados referentes ao período seco, de transição e úmido.....77

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAS	Conteúdo de água do solo
EOS	Fim da estação foliar
ET_0	Evapotranspiração de referência
INPE	Instituto Nacional de ´Pesquisas Espaciais
FDN	Densidade de fluxo de seiva normalizado
LOS	Duração do estágio fonológico
SOS	Início da estação foliar
STDF	Florestas tropicais sazonalmente secas
TDP	Método de dissipação térmica
VPD	Déficit de pressão e vapor
TDs	Datas de transição
DOY	Dia do ano
Mm	Milímetro

LISTA DE SÍMBOLOS

δ	Delta
∆T	Diferença de temperatura
∆T max	Diferença de temperatura Máxima
Z	Espessura da camada do solo
‰	Por mil
Ψ	Potencial mátrico do solo

SUMÁRIO

Pág.

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Contexto climático 1
1.2 O bioma Caatinga e os desafios hídricos 1
1.3 Estratégias ecofisiológicas de vegetação da Caatinga 3
1.4 Abordagem metodológica: integração entre isótopos estáveis e fluxo de seiva 4
1.5 Justificativa e relevância do trabalho 6
2 REVISÃO DE LITERATURA 7
2.1 Características e usos das espécies estudadas 7
2.2 Isotopos estáveis da água 11
2.2.1 Breve histórico e aplicações 11
2.2.2 Conceito de isótopos estáveis 12
2.2.3 Fracionamento isotópico 14
2.2.4 Estratégias hidráulicas das plantas e suas fontes de água: perspectivas isotópicas 16
3 OBJETIVOS 18
3.1 Geral 18
3.2 Específicos 18
4 MATERIAIS E MÉTODOS 19
4.1 Área de estudo 19
4.2 Dados meteorológicos 20
4.3 Umidade e potencial mátrico de água no solo 22
4.4 Levantamento florístico e selação das espécies 23
4.5 Fenologia foliar 24
4.6 Coletas e amostras Isotópicas 25
4.7 Determinação da assinatura isotópica 26
4.8 Medida do fluxo de seiva 27
4.9 Análises estatíticas 28
4.9.1 Estatística circular (Fenologia foliar) 28

4.9.2 Sinal isotópico da água 28
4.9.3 Fluxo de seiva 29
5 RESULTADOS 31
5.1 Climatologia da área de estudo 31
5.1.1 Precipitação histórica 31
5.1.2 Evapotranspiração de referência (ET_0), Déficit de pressão de vapor (VPD) Conteúdo de água no solo (CAS) e potencial mátrico do solo (Ψm - PM) 33
5.2 Fenologia foliar 35
5.3 Isótopos de água 39
5.3.1 Caracterização isotópica da água da chuva, solo e do xilema 39
5.3.2 Distribuição isotópica no espaço dual (δ^2H vs. $\delta^{18}O$) ao longo dos períodos sazonais 40
5.3.3 δ^2H (‰) e $\delta^{18}O$ (‰) por espécie e profundidade do solo 43
5.4 Fluxo de seiva 46
5.4.1 Variação de FDN entre as espécies 47
5.4.2 Reações de FDN com as variáveis ambientais (VPD, Armazenamento de água no solo e potencial mátrico do solo) 49
6 DISCUSSÃO 54
6.1 Isótopos estáveis de água - Fontes de água 54
6.2 Fluxo de seiva 58
7 CONCLUSÃO 64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 66
APÊNDICE A - OUTROS EXEMPLOS DE FIGURAS E TABELAS 77

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto climático

O mundo enfrenta uma ampla crise ambiental, impulsionada pelas atividades humanas, cujos efeitos incluem, entre outros, o agravamento das mudanças climáticas. Essas crises estão cada vez mais interligadas ao desmatamento promovido pelo uso agrícola da terra (CURTIS et al., 2018), o que leva à perda de importantes serviços ecossistêmicos, como a regulação climática e a provisão de água. Como consequência, há uma redução na capacidade de sequestro de carbono e um aumento das emissões de CO_2, intensificando o efeito estufa e agravando a escassez de água em diversas regiões (IPBES, 2019).

Esse cenário é especialmente preocupante para as florestas tropicais sazonalmente secas (STDF, do inglês Seasonal Tropical Dry Forests), que têm sido severamente desmatadas nas últimas décadas (MILES et al., 2006; SIYUM, 2020). No Brasil, as áreas semiáridas do Nordeste, como a Caatinga, são particularmente vulneráveis devido à já limitada disponibilidade de água (SANTOS et al., 2012). Essa vulnerabilidade é agravada pelas pressões simultâneas do desmatamento e das mudanças climáticas, afetando tanto os ecossistemas quanto as populações locais (ALVES, 2007; MELO et al., 2023).

1.2 O bioma Caatinga e os desafio hídricos

A Caatinga representa um bioma exclusivamente brasileiro, abrangendo cerca de 11% do território nacional e aproximadamente 70% da região Nordeste. O bioma Caatinga está localizado na região semiárida mais populosa do mundo, e sustenta cerca de 28 milhões de pessoas (HOLANDA et al., 2024), que diariamente convivem com a escassez hídrica e desafios, limitando suas condições socioeconômicas (MARENGO et al., 2017). As florestas da Caatinga, embora naturalmente adaptadas a condições semiáridas, estão cada vez mais vulneráveis aos impactos combinados das mudanças climáticas e das pressões antrópicas (TABARELLI; SILVA, 2002).

O aumento da temperatura e a redução na disponibilidade hídrica intensificam a evapotranspiração e o estresse hídrico, alterando a fenologia e elevando a mortalidade de espécies sensíveis. A irregularidade das chuvas e a maior frequência de eventos extremos, como secas prolongadas, comprometem a regeneração natural da vegetação e aumentam o risco de colapso ecológico, afetando também a segurança hídrica e alimentar das populações humanas.

Adicionalmente, a degradação ambiental, impulsionada por fatores como o desmatamento, fragmentação de habitats, degradação do solo, introdução de espécies exóticas e o sobrepastoreio por caprinos intensificam a competição com espécies nativas, favorecendo processos de desertificação (LEAL et al., 2003; LIMA et al., 2024; VENTURA; SANTOS, 2020). Tais fatores, reduzem a cobertura vegetal, prejudicam a conectividade ecológica e comprometem os serviços ecossistêmicos essenciais, como a retenção de água e a regulação do clima. Embora a Caatinga apresente estratégias de resiliência às secas, o acúmulo de estresses pode levar ao colapso funcional em escala de ecossistema, tornando urgente a adoção de medidas de conservação e adaptação.

O bioma Caatinga, caracterizado por um mosaico de STDF e vegetação arbustiva (PENNINGTON et al., 2009; FERNANDES et al., 2020), destaca-se por seu regime climático singular, marcado por alta variabilidade espacial e temporal na precipitação. Com chuvas anuais máximas de 800 mm, déficit hídrico superior a 60% e taxas de evaporação que excedem 2000 mm ano^{-1} (ALVARES et al., 2013), esse ecossistema apresenta um balanço hídrico crítico: 88% da precipitação retorna à atmosfera por evapotranspiração, enquanto apenas 3% recarrega os aquíferos subterrâneos (ANDRADE et al., 2016; 2017). Pressões antrópicas e mudanças climáticas globais (MORO et al., 2015) agravam esses desafios, intensificando secas prolongadas, variabilidade interanual das chuvas e redução da umidade do solo (BRITO et al., 2020). Tais condições limitam sinergicamente processos fisiológicos vegetais, recrutamento e sobrevivência das espécies (ANDERSON-TEIXEIRA et al., 2014; MARTÍNEZ-VILALTA et al., 2014). Diante desse cenário de vulnerabilidade hídrica e pressões múltiplas, compreender as estratégias funcionais e ecofisiológicas da vegetação da

Caatinga — especialmente em relação ao uso da água — é essencial para fundamentar ações de conservação e adaptação aos desafios socioambientais futuros.

1.3 Estratégias ecofisiológicas da vegetação da Caatinga

Para resistir às condições de limitação hídrica, a vegetação da Caatinga desenvolveu estratégias ecológicas especializadas que vão desde a capacidade de armazenar água nos tecidos dos caules até a interrupção dos processos fisiológicos, por meio da perda total de folhas (POORTER; MARKESTEIJN, 2008). Essas estratégias variam conforme os traços funcionais das espécies. Espécies decíduas, por exemplo, exibem sistemas radiculares dimórficos (raízes rasas e profundas), modulando sua arquitetura conforme a sazonalidade climática (LLOYD et al., 2009). Essas plantas também reduzem potenciais hídricos, diminuem o tamanho foliar e fecham estômatos para evitar perdas excessivas de água (OLIVEIRA et al., 2004). Além dessas adaptações específicas, observam-se estratégias gerais como a captação de umidade atmosférica através das folhas (ELLER et al., 2013), incluindo casos de fluxo hidráulico reverso e períodos de dormência temporária durante os estágios mais críticos de estresse hídrico.

Já espécies com caules suculentos e baixa densidade lenhosa (8–10% das STDF, e.g., *Commiphora leptophloeos* e *Manihot cartaghenensis*; SILVA et al., 2020) são mais vulneráveis a embolismos e cavitação (perda de até 50% da condutividade hidráulica; HARTZELL et al., 2017; COSME, 2023), mas compensam essa fragilidade com a abscisão foliar precoce, sincronizada com o fim das chuvas (POORTER; MARKESTEIJN, 2008; PEZZINI et al., 2014). A fenologia foliar é ainda influenciada pela umidade do solo e precipitação, com variações interindividuais no tempo de brotação (BARBOSA et al., 2003; RIVERA et al., 2002; LIMA; RODAL, 2010; WRIGHt et al., 2021; PALOSCHI et al., 2021), o que altera dinamicamente as fontes hídricas disponíveis e os fluxos de seiva.

Essa diversidade de mecanismos revela um complexo espectro de respostas ao desafio hídrico, onde cada espécie parece ter desenvolvido sua própria

combinação de soluções para enfrentar as adversidades climáticas do semiárido. Embora as estratégias vegetais de resistência às secas sejam relativamente bem documentadas na literatura (POORTER; MARKESTEIJN, 2008; HARTZELL et al., 2017), persistem lacunas críticas na compreensão de como esses mecanismos se articulam com as fontes hídricas efetivamente utilizadas ao longo do ciclo sazonal. Particularmente na Caatinga, onde a variabilidade interanual extrema da precipitação (ALVES et al., 2021) e a heterogeneidade edáfica (ANDRADE et al., 2017) criam gradientes complexos de disponibilidade hídrica, torna-se essencial responder: (i) como as plantas alternam entre fontes superficiais e profundas em diferentes estações, e (ii) de que forma o fluxo de seiva muda em relação às variáveis ambientais para sustentar suas estratégias ecofisiológicas.

1.4 Abordagem metodológica: integração entre isótopos estáveis e fluxo de seiva

A análise de isótopos estáveis (δ^2H e $\delta^{18}O$) oferece vantagens únicas para estudos ecohidrológicos: (i) capacidade de discriminar fontes hídricas mesmo em sistemas complexos, (ii) natureza não destrutiva e (iii) exigência de pequenas quantidades de amostra (BARBETA et al., 2015). Essa técnica permite mapear o uso de água em diferentes profundidades do solo sob condições naturais (YANG et al., 2010) e estimar a eficiência hídrica vegetal em cenários de mudanças climáticas. No entanto, embora as assinaturas isotópicas sejam fundamentais para modelar balanços hídricos regionais (INGRAHAM; TAYLOR, 1991), elas apresentam limitações intrínsecas: o fracionamento isotópico durante a transpiração (BARBOUR, 2007) e a homogeneização da água xilemática podem mascarar processos dinâmicos em escalas finas de tempo (VARGAS et al., 2017). Um outro aspecto da limitação das análises isotópicas refere-se à capacidade de amostragem de potenciais fontes de água para as plantas, como no caso dessas fontes serem águas de camadas muito profundas em solo pedregoso (que dificulta a coleta) ou a água de orvalho em regiões semiáridas.

Para uma melhor compreensão do funcionamento ecohidrológico de espécies da Caatinga, este estudo adotou uma abordagem integrada, combinando

análises isotópicas com medições contínuas de umidade do solo e de taxas de fluxo de seiva. O fluxo de seiva é um elo fundamental no continuum solo-planta-atmosfera através do qual aproximadamente 98% da água absorvida pelas plantas é devolvida à atmosfera por meio da transpiração das folhas (LI et al., 2025). Essa integração metodológica entre fluxo de seiva e análises isotópicas – adotada em estudos como os de Dubbert et al. (2014) em ecossistemas mediterrâneos e Oerter et al. (2019) em zonas ripárias – permite correlacionar as fontes hídricas identificadas isotopicamente com a dinâmica real de absorção vegetal, além de auxiliar no entendimento como variações sazonais na disponibilidade hídrica afetam a estratégia de uso de água pelas plantas. Evidencias oriundas de ecossistemas semiáridos, como demostrado por ex.: Querejeta et al. (2021), sugerem que essa abordagem multimétrica é essencial para desvendar mecanismos de resiliência ao estresse hídrico, particularmente em cenários onde os sinais isotópicos das fontes podem se sobrepor (ROTHFUSS; JAVAUX, 2017).

Para elucidar as questões propostas foi conduzido um estudo integrado em área de vegetação de Caatinga em Pernambuco, Brasil. O estudo consistiu em combinar análises isotópicas com monitoramento ecohidrológico (chuva, umidade do solo e transpiração) em uma parcela permanente de 0,5 ha implantada durante a execução do Projeto Nordeste (FAPESP 2015/50488-5). A análise e interpretação dos dados envolveu três componentes principais: i) análise da variabilidade sazonal do sinal isotópico (período seco, chuvoso e transição), da água do xilema em indivíduos previamente selecionados, da água do solo em cinco profundidades (5-50 cm), e da água de chuva; ii) análise dos dados de umidade e potencial mátrico do solo nas mesmas profundidades onde foi analisado o sinal isotópico; iii) análise dos dados de fluxo de seiva em quatro das cinco espécies para as quais foi realizada a análise isotópica.

Esses três conjuntos de dados foram avaliados de forma integrada, com o objetivo de identificar como as espécies vegetais modulam a absorção e o uso da água ao longo do gradiente sazonal. A comparação entre os sinais isotópicos da água do xilema e das potenciais fontes (solo e chuva), aliada à variação na umidade e no potencial mátrico do solo, permitiu inferir a profundidade mais

provável de absorção de água pelas plantas em cada período. Paralelamente, os dados de fluxo de seiva forneceram uma medida funcional da atividade do fluxo de seiva da vegetação, permitindo verificar se a extração de água detectada isotopicamente se traduz em uso efetivo da água ao nível fisiológico. Essa abordagem integrada possibilita compreender as estratégias hidráulicas das espécies estudadas e como essas estratégias se ajustam às restrições sazonais de disponibilidade hídrica na caatinga.

1.5 Justificativa e relevância do trabalho

Com o avanço das mudanças climáticas e o impacto nos diferentes biomas, especialmente na Caatinga, um dos biomas mais secos e climaticamente variáveis do Brasil, torna-se urgente aprofundar o conhecimento sobre os mecanismos de resposta das plantas às restrições hídricas.

Além disso, os resultados obtidos poderão fornecer subsídios para prever como essas espécies responderão a cenários futuros de mudanças climáticas, já que o bioma enfrenta um risco significativo de perda de espécies devido às questões climáticas e à gestão ambiental inadequada. Este estudo pode auxiliar na elaboração de estratégias de conservação e restauração ecológica deste bioma. Tornam-se importantes, portanto, os estudos das respostas pontuais das espécies em suas condições naturais e sob intensificação da seca para auxiliar nas projeções de modelos clima-vegetação de longo prazo (GROSSIORD et al., 2017). O trabalho não apenas avança o entendimento científico sobre a dinâmica funcional da Caatinga, mas também oferece bases para a preservação de sua biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos que ela proporciona.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Características e usos das espécies estudadas

Neste estudo, selecionamos espécies lenhosas decíduas, típicas da fisionomia da Caatinga, que apresentam maior dominância na área do presente estudo. Dentre elas, destacamos as seguintes espécies:

a) *Commiphora leptophloeos*

Commiphora leptophloeos (Mart.) J.B. Gillet, pertencente à família Burseraceae e popularmente conhecida como Imburana do Sertão ou Imburana-de-Cambão, é uma das espécies mais representativas do bioma Caatinga, com alta densidade e valores elevados de importância ecológica (MARANGON et al., 2013). Sua distribuição não se restringe apenas à Caatinga, pois não é endêmica dessa região, podendo também ser encontrada em áreas tropicais e subtropicais, como no estado de Goiás, no bioma Cerrado (PEREIRA et al., 2017).

Ecologicamente, *C. leptophloeos* pertence ao grupo funcional de espécies decíduas, ou seja, perde suas folhas durante a estação seca. Apresenta comportamento heliófilo, pioneiro e xerófilo, características que a tornam bem adaptada a ambientes áridos e semiáridos. Segundo Lima (2010), essa espécie exibe mecanismos de floração e frutificação durante a estação seca, o que a torna uma importante fonte de recursos para polinizadores e dispersores de sementes em períodos de escassez alimentar. Apesar de seu crescimento rápido, a espécie está em risco de extinção devido à produção limitada de sementes. Além disso, sua madeira possui baixa densidade, com valor médio de 0,43 $g.cm^{-3}$ (CARVALHO, 2009), devido à presença de fibras septadas em seu xilema secundário, que permitem o armazenamento de água no caule (CARVALHO et al., 2023).

A *C. leptophloeos* tem diversos usos, tanto para as comunidades locais quanto para a ciência. Seus óleos extraídos das folhas têm demonstrado eficácia no combate ao mosquito *Aedes aegypti*, sendo considerados uma das fontes vegetais mais promissoras para o controle desse vetor (SILVA et al., 2022). Além

disso, extratos vegetais dessa espécie apresentam atividade antimicrobiana contra *Staphylococcus aureus*, abrindo caminho para o desenvolvimento de novos medicamentos no tratamento de doenças infecciosas (PEREIRA et al., 2017).

Dada sua relevância ecológica, econômica e medicinal, é fundamental estudar aspectos fisiológicos da *C. leptophloeos*, como a transpiração. Compreender os mecanismos de transpiração dessa espécie pode fornecer *insights* sobre sua adaptação a ambientes áridos, sua eficiência no uso da água e sua capacidade de sobrevivência em condições climáticas extremas. Esses estudos são essenciais para a conservação da espécie, especialmente em um cenário de mudanças climáticas, e podem contribuir para estratégias de manejo sustentável e restauração dos ecossistemas da Caatinga. Além disso, o entendimento desses processos pode auxiliar no desenvolvimento de práticas agrícolas e de reflorestamento mais eficientes, garantindo a preservação da espécie e os serviços ecossistêmicos que ela proporciona.

b*) Manihot carthagenensis*

Manihot carthagenensis (Jacq.) Müll.Arg., pertencente à família das Euforbiáceas, é uma espécie que pode se apresentar como árvore ou arbusto, com altura variando entre 1 e 5 metros. Conhecida popularmente como mandioca de veado, maniçoba ou seringueira do Ceará, essa espécie é predominante no bioma Caatinga, mas também pode ser encontrada em florestas estacionais semidecíduas e florestas ombrófilas (ORLANDINI et al., 2020). O Brasil é reconhecido como o principal centro de biodiversidade do gênero *Manihot*, que inclui a mandioca (*Manihot esculenta*), um dos alimentos mais consumidos na América Latina e na África (NASSAR et al., 2008).

O gênero *Manihot* é conhecido por sua adaptação a ambientes secos e por se desenvolver em solos pobres, tanto calcários e bem drenados quanto pouco profundos e pedregosos (NASSAR et al., 2008; BELTRÃO et al., 2015). Ecologicamente, *M. carthaginensis* apresenta fenologia foliar decídua, perdendo suas folhas em determinados períodos, e possui raízes tuberosas, com presença de xilopódios, que armazenam substâncias de reserva, como o amido e água

(MENDOZA et al., 2020). Sua madeira tem baixa densidade, com valor médio de 0,47 g.cm^{-3}.

Embora seja considerada decídua, um estudo realizado no Recôncavo da Bahia sobre a fenologia das espécies do gênero *Manihot* revelou que *M. carthaginensis* pode exibir um padrão foliar perenifólio, mantendo suas folhas por longos períodos, mesmo durante a estação seca. Essa característica está associada a uma alta sincronia fenológica, onde a redução da queda foliar coincide com o aumento da temperatura média mensal e a diminuição da precipitação. Isso sugere que as árvores conseguem reter suas folhas mesmo em condições climáticas adversas (OLIVEIRA, 2018).

A espécie também pode ser conhecida por alguns sinônimos, como *Manihot glaziovii*, uma subespécie selvagem de mandioca não comestível (ALLEN, 2001). Seus usos são variados: pode servir como matéria-prima para a produção de bioenergia (MORSHI et al., 2014) e é utilizada na fabricação de borracha. No entanto, é considerada uma espécie potencialmente invasora, o que requer atenção em relação ao seu manejo e controle.

c) *Cenostigma microphyllum*

Cenostigma microphyllum (Mart. Ex G. Don), conhecida popularmente como catingueira-de-folha-miúda, é uma espécie nativa do Brasil, com ocorrências nos estados de Pernambuco, Bahia e Piauí. Endêmica da Caatinga, essa planta é conhecida por seu papel ecológico e sua utilidade para as comunidades locais. Apresenta forma de vida variável entre arbusto e árvore, é caducifólia (perde as folhas em determinadas épocas) e pode atingir cerca de 5 metros de altura. Sua madeira possui alta densidade, com valores médios de 0,79 g.cm^{-3}, o que a torna valiosa para uso como lenha e madeira.

Pertencente à família Fabaceae, a catingueira-de-folha-miúda é altamente abundante na Caatinga e tem grande importância para as populações locais. Suas folhas são uma fonte de alimento para o gado, especialmente em períodos de seca, e sua madeira é amplamente utilizada como lenha e para outros fins (GOMES et al., 2019; NEMA, 2025). Além disso, a espécie é utilizada como erva

medicinal, com as cascas sendo preparadas em forma de infusão para chás no tratamento de doenças digestivas, infecções e inflamações (SILVA et al., 2020).

A catingueira-de-folha-miúda é uma espécie muito comum em áreas degradadas da Caatinga e é frequentemente utilizada em processos de recuperação dessas áreas. Isso ocorre porque ela é considerada uma espécie facilitadora, ajudando no processo de regeneração florestal. Sua resistência e adaptabilidade às condições semiáridas fazem dela uma aliada essencial para a conservação e o uso sustentável da Caatinga.

d) *Senegalia piauhiensis*

Senegalia piauhiensis (Benth.) Seigler & Ebinger, pertencente à família Fabaceae, é uma espécie com fenologia foliar decídua e forma de vida variável, podendo se apresentar como arbustiva, arbórea ou liana. Conhecida popularmente como acácia, jurema-branca ou jurema-de-caboclo, também pode ser referida pelo sinônimo *Acacia piauhiensis* Benth. (TERRA; MORIN, 2020). Essa espécie está inserida no domínio fitogeográfico da Caatinga nordestina, mas sua ocorrência também foi confirmada no estado de Minas Gerais.

A madeira de *Senegalia piauhiensis* possui alta densidade, com valores médios de 0,74 $g.cm^{-3}$, o que a torna útil principalmente para a construção de cercas e como lenha. Além disso, essa espécie desempenha uma importante função ecológica em áreas de regeneração, uma vez que o gênero *Senegalia* é conhecido por sua alta capacidade de rebrota (SILVA et al., 2021). Outra característica marcante é o sistema radicular superficial e ramificado, uma estratégia adaptativa para competir por recursos limitantes, como água e nutrientes, em ambientes semiáridos (SILVA et al., 2021). Assim, *Senegalia piauhiensis* destaca-se não apenas por sua utilidade prática para as comunidades locais, mas também por seu papel ecológico na regeneração de áreas degradadas e na adaptação às condições adversas da Caatinga. Algumas dessas informações estão organizadas na tabela abaixo (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Características gerais das espécies estudadas no presente estudo.

Nome Científico	Nome Popular	Familia botânica	Densidade da Madeira	Principais Usos
Commiphora leptophloeos	Imburana do Sertão	Burseraceae	Baixa	Controle de Aedes aegypti, atividade antimicrobiana, madeira, fontes de recursos para fauna
Manihot carthaginensis	Mandioca de veado	Euforbiáceas	Baixa	Bioenergia, produção de borracha, potencialmente invasora
Cenostigma microphyllum	Catingueira-de-folha-miúda	Fabaceae	Alta	Lenha, erva medicinal, recuperação de áreas degradadas, fonte de alimento para o gado
Senegalia piauhiensis	Acacia, Jurema-branca, Jurema-de-caboclo	Fabaceae	Alta	Construção de cercas, lenha, regeneração de áreas degradadas, adaptação a ambientes semiárido

2.2 Isótopos estáveis da água

2.2.1 Breve histórico e aplicações

Os estudos com isótopos estáveis datam da década de 1940 com os trabalhos de Urey (1947), Bigeleisen e Meyer (1947) e Epstein e Mayeda (1953). A base científica para o fracionamento isotópico foi inicialmente desenvolvida por Urey (1947) que focou seu trabalho no isolamento de algumas espécies isotópicas, dentre elas, o hidrogênio e o oxigênio. No Brasil, os primeiros estudos com isótopos datam da década de 80 (PEREIRA et al., 2004; COSTA et al., 2010). Foi nesta época também, que os ecólogos começaram a utilizar esta técnica tanto em organismos vegetais, como em animais (PETERSON; FRY, 1987).

Uma pesquisa pioneira de White et al. (1985) determinou a fonte de água da planta usando espécies arbóreas nos Estados Unidos para comparação isotópica da seiva da planta com a composição isotópica da chuva e das águas subterrâneas. Posteriormente, esta técnica foi aplicada também nos Estados Unidos, porém em ambiente árido (EHLERINGER et al., 1991). A partir disso, vários estudos foram desenvolvidos dentro desta temática (ZHAO et al., 2008; YANG et al., 1998). Muitas áreas obtiveram sucesso no conhecimento desta técnica e corroboram a necessidade de investimentos e base científica com isótopos estáveis no Brasil e no mundo. Por exemplo, os isótopos naturais estáveis estão sendo usados em estudos arqueológicos e geológicos e, atualmente, apresentam destaque em diversas pesquisas de diferentes áreas, como, ecologia, biologia, fisiologia, paleoclima, estudos hidrológicos e em outras áreas de igual importância (DUCATTI et al., 2011).

O número de estudos ecohidrológicos envolvendo medições de isótopos estáveis da água tem aumentado significativamente, impulsionado por avanços tecnológicos — como a espectroscopia a laser para uso em campo e a disponibilidade de equipamentos mais acessíveis — e metodológicos, incluindo o uso de traçadores e aprimoramentos nos modelos de absorção radicular (BEYER et al., 2020). Esses progressos têm permitido a incorporação de métodos isotópicos em diferentes áreas da ciência, ampliando seu alcance e aplicação.

Dentre as abordagens mais utilizadas, destaca-se o uso da abundância natural dos isótopos de oxigênio ($\delta^{18}O$) e hidrogênio ($\delta^{2}H$), que se baseia no enriquecimento evaporativo desses elementos próximo à superfície do solo. Esse processo gera um gradiente isotópico ao longo do perfil de profundidade, permitindo a inferência sobre a origem da água absorvida pelas plantas (VON FREYBERG et al., 2020). Barbeta et al. (2022), por exemplo, realizaram um experimento sistemático e observaram deslocamentos isotópicos entre a água do solo e a do caule, os quais foram atribuídos, majoritariamente, à heterogeneidade isotópica nos poros do solo e nos tecidos do caule. Esses achados evidenciam que, embora a técnica de abundância natural seja amplamente utilizada e valiosa para estimar a profundidade de absorção de água pelas plantas, sua aplicação requer cautela na interpretação dos resultados, especialmente em ambientes onde a estrutura do solo ou a anatomia da planta podem introduzir variações isotópicas independentes do processo de absorção radicular.

2.2.2 Conceito de isótopos estáveis

Por definição, todos os isótopos são espécies atômicas de um mesmo elemento químico, que apresentam o mesmo número de prótons (Z), porém diferentes números de nêutrons (N), consequentemente, apresentam diferenças em suas massas atômicas (BAETA et al., 2018). Por exemplo, o oxigênio possui três isótopos estáveis: $^{18}O/^{17}O/^{16}O$, sendo que o ^{16}O é o mais leve e mais abundante quando comparado aos seus isótopos que são formas mais raras e pesadas encontradas na natureza (HOLDEN et al., 2018). Os isótopos são de origem

natural e são considerados estáveis por que sua massa atômica não é alterada com o passar do tempo (não se decompõem em outros elementos, não prejudica a saúde e nem o meio ambiente), o que os diferem dos isótopos instáveis ou radioativos (BAETA et al., 2018). Estes últimos, mudam sua massa com o passar da existência devido à emissão de energia ou partícula subatômica (MARTINELLI et al., 2009).

Na categoria de isótopos estáveis, pode-se citar os isótopos de nitrogênio (^{14}N, ^{15}N), hidrogênio (^{1}H, ^{2}H, ^{3}H), carbono (^{12}C, ^{13}C, 14C), enxofre (^{32}S, ^{34}S) e oxigênio (^{16}O, ^{18}O). Estes isótopos participam de variados processos de interesse biológico e hidrogeoquímico (FRITZ; FONTES, 1980).

Os isótopos estáveis da água são representados pelas espécies isotópicas de oxigênio ($^{18}O/^{17}O/^{16}O$) e de hidrogênio ($^{1}H/\ ^{2}H$) (^{2}H também é conhecido como deutério, D). Estes isótopos fazem parte da própria molécula de H_2O e são utilizados como traçadores naturais de uma massa real de água (BARBOSA et al., 2018; KENDALL; MCDONNELL, 1998). Os mais pesados, por exemplo, o ^{18}O e D são considerados raros na natureza em relação aos mais leves ^{1}H e ^{16}O. As concentrações dos isótopos pesados são dadas em notação delta (isótopo delta - δ) que representa a proporção de isótopos pesados para leves, por exemplo, ^{2}H / ^{1}H para deutério e ^{18}O / ^{16}O para oxigênio de uma amostra de água para uma água padrão (GONFIANTINI et al., 1995). O padrão utilizado para os isótopos das moléculas de água é VSMOW (do inglês, Vienna Standard Mean Ocean Water). Tal padrão, refere-se a uma mistura de água dos oceanos para qual foi atribuído o valor 0 ‰. A notação delta é dada em partes por mil (‰), já que as razões entre as diferenças das espécies isotópicas são muito pequenas, costuma-se multiplicar a expressão por 1000, (GRIFFIS, 2013, DUCATTI, 2011). Ou seja, uma amostra que mede 10‰ é apenas 1% diferente do padrão.

A Equação (2.1) que expressa a diferença entre o valor da amostra e o padrão, é dada por:

$$\delta(‰) = \left(\frac{R_{coleta} - R_{padrão}}{R_{padrão}}\right) * 1000 \qquad (2.1)$$

onde: R_{coleta} e $R_{padrão}$ são razões entre isótopos pesados e leves na água coletada em comparação com uma água padrão conhecida (ARAGUÁS - ARAGUÁS et al., 2000).

Para exemplificar as sutis variações isotópicas existentes, usamos uma terminologia específica, tais como: isótopos mais leves, mais pesados ou mais empobrecidos (deplecionado) e mais enriquecido. Teremos valores positivos e negativos em função das razões ao comparar com a amostra padrão. Graig (1961a) demonstrou que existia uma relação com os isótopos de água δ^2H e $\delta^{18}O$ e que essa relação obedecia a uma equação linear conhecida como reta meteórica global (GMWL) (do inglês, Global Meteoric Water Line), representada pela Equação (2.2):

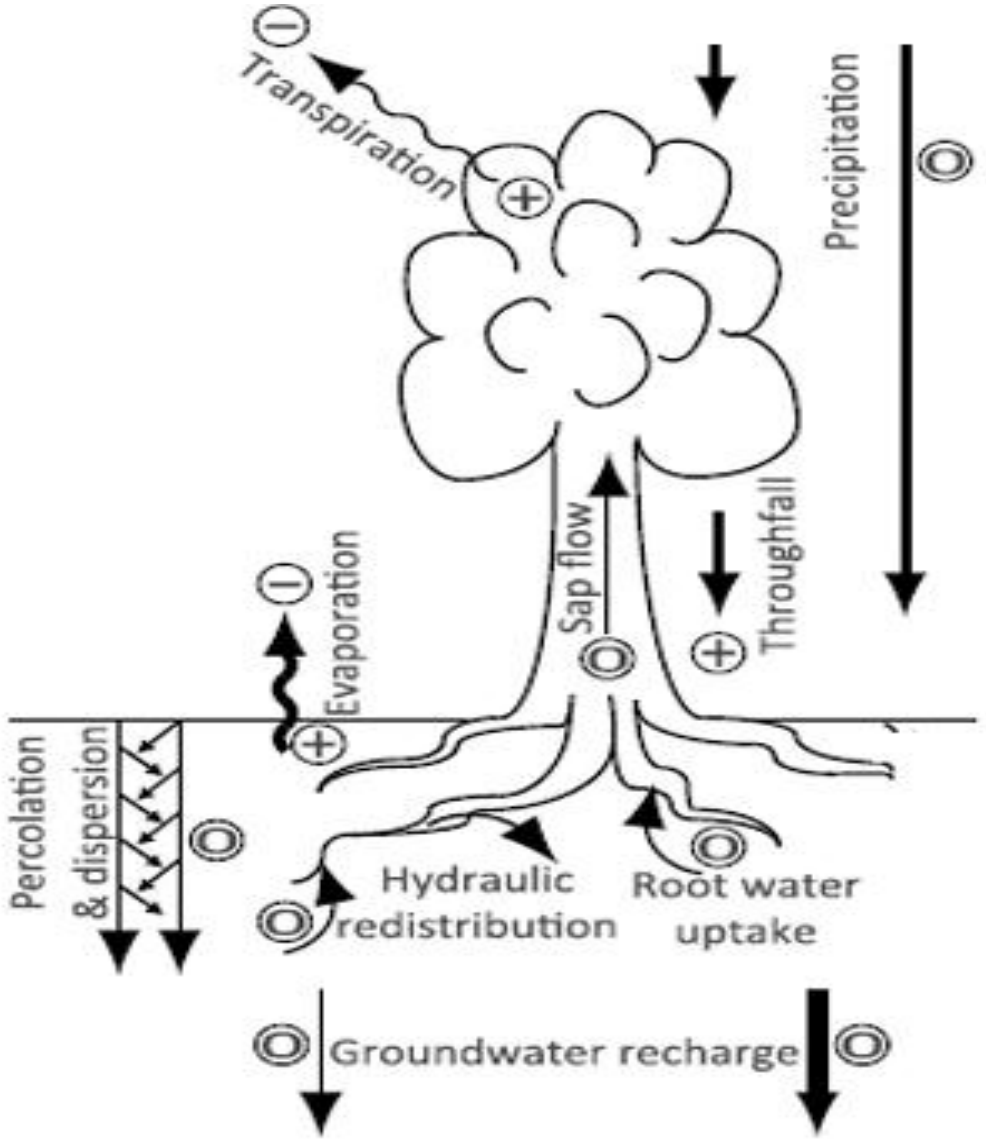
$$\delta^2H = 8 * \delta^{18}O + 10 \quad (2.2)$$

A GMWL apresenta inclinação de 8 e é a partir dela que podemos fazer comparações com as amostras de água coletada. Já a reta meteórica Local (LMWL) (do inglês, Local Meteoric Water Line), também representa uma relação entre δ^2H e $\delta^{18}O$ da água coletada com um padrão local. Amostras da água abaixo da reta meteórica indicam que aquela água passou por processos evaporativos ou fracionamento isotópico deixando a amostra mais enriquecida. Assim, durante a análise isotópica da água do xilema da planta e do solo, por exemplo, faz-se necessário plotar uma reta com as linhas meteóricas para analisar a assinatura isotópica das possíveis fontes de água da vegetação.

2.2.3 Fracionamento isotópico

Fracionamento isotópico é definido como a variação ou separação na proporção entre os isótopos estáveis ao passar por um processo físico-químico (MARTINELLI et al., 2009). Desta forma, o fracionamento refere-se à separação entre os isótopos leves e pesados, onde as moléculas de água mais pesadas vão apresentar uma mobilidade menor quando comparada as leves. No caso de isótopos da água, esse fracionamento está ocorrendo constantemente, à medida que a molécula de água se move ao longo do ciclo hidrológico (Figura 2.1).

Figura 2.1 - Visão geral dos processos de fracionamento isotópico da água que ocorrem na interação solo - planta - atmosfera.



O sinal de '+' indica um processo de fracionamento isotópico levando ao enriquecimento em isótopos pesados, o sinal de '-' representa depleção em isótopos pesados e o zero é um sinal de processos de não fracionamento.
Fonte: Adaptado de Sprenger et al. (2016).

Este fracionamento ocorre porque o ciclo hidrológico envolve mudanças de fase da água - i.e., do estado gasoso para o estado líquido e vice-versa (KUMAR, 2018). Nesse processo, a pequena diferença atômica dos compostos isotópicos é primordial. É a partir deste fracionamento que se pode discriminar o uso da técnica de isótopos estáveis (CAXITO; SILVA, 2015).

2.2.4 Estratégias hidráulicas das plantas e suas fontes de água: perspectivas isotópicas

Estudos isotópicos das possíveis fontes de água são de importância para o conhecimento científico das relações planta-água, eficiência do uso da água pela vegetação e balanço hídrico local e regional. Em florestas secas, é importante fornecer informações sobre as fontes de água utilizadas pelas plantas, visto que a água é fator limitante para este ecossistema. Assim, faz-se importante conhecer as possíveis fontes de água utilizadas pelas plantas, tais como: precipitação proveniente de diferentes períodos do ano, água de diferentes profundidades do solo, escoamento (incluindo degelo) e água subterrânea (DAWSON, 1993). Porém, vale destacar que todas as fontes de água são originárias da água meteórica (água da chuva).

A água utilizada para transpiração das plantas pode vir de uma única fonte ou de fontes distintas, ou seja, de áreas de multi-mistura (MEINZER et al., 2001). A avaliação das fontes de água da vegetação pode ser realizada a partir do método tradicional (comprimento e atividade da raiz) (REICH, 2002). Porém, este método é destrutivo e de difícil mensuração já que a absorção da água em determinadas profundidades do solo pode não refletir a real fonte de água utilizada pela vegetação, devido ao efeito de multi-mistura e/ou plasticidade fenotípica da raiz da planta (distribuição funcional da raiz) (THORBURN; EHLERINGER, 1995, BARBETA et al., 2015). Neste sentido, a análise de isótopos estáveis da água é uma ferramenta promissora para o entendimento das relações água – vegetação.

As fontes de água podem sofrer variações ou fracionamento isotópico influenciado por fatores físicos, como: a evaporação da água do solo, tamanho e a extensão da elevação da bacia hidrográfica, profundidade e as características geológicas do aquífero subterrâneo e dissolução e velocidade do movimento da água entre as fontes de água (INGRAHAM; TAYLOR, 1991). A água atmosférica também sofre variação em função da temperatura, da continentalidade, altitude, sazonalidade, quantidade de precipitação e origem do vapor de água (WEI et al., 2018; YANG et al., 2019). As plantas que habitam as

regiões áridas e semiáridas do globo vivem sobre um padrão bimodal de precipitação, no qual a chuva originária dessas regiões mais quentes reflete em uma composição isotópica mais enriquecida em ^{18}O e D (DAWSON, 1993b). Geralmente, são chuvas rápidas que ocorrem no verão e, portanto, não penetram as camadas mais profundas do solo, permitindo assim, que as camadas superficiais do solo apresentem padrão de fracionamento enriquecido (EHLERINGER et al., 1991; SPRENGEr et al., 2016). Já as chuvas de inverno conseguem chegar até as camadas mais profundas do solo obtendo uma composição isotópica mais deplecionada nos isótopos pesados de ^{18}O e D (DAWSON et al., 1991). As condições de clima árido e semiárido podem levar a um estado de fracionamento decrescente ao longo da profundidade do solo, enquanto que este fracionamento em regiões mediterrâneas e tropicais é relativamente pequeno (ALLISON et al., 1983; SPRENGER et al., 2016).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo geral compreender as respostas ecofisiológicas de espécies lenhosas decíduas da Caatinga frente à sazonalidade climática, a partir de duas abordagens complementares: (I) investigar as potenciais fontes de água utilizadas na transpiração de espécies da Caatinga e sua variabilidade sazonal; e (II) avaliar como o fluxo de seiva em espécies lenhosas decíduas da Caatinga responde às variações sazonais e às condições ambientais, como o déficit de pressão de vapor, a umidade e o potencial hídrico do solo.

Ao integrar essas duas perspectivas, pretende-se avançar na compreensão das estratégias hidráulicas adotadas por espécies da Caatinga diante das restrições hídricas impostas por seu ambiente semiárido.

3.2 Objetivos específicos

1. Determinar se as espécies ajustam o uso de fontes de água ao longo das estações, em resposta aos períodos seco, de transição e úmido;

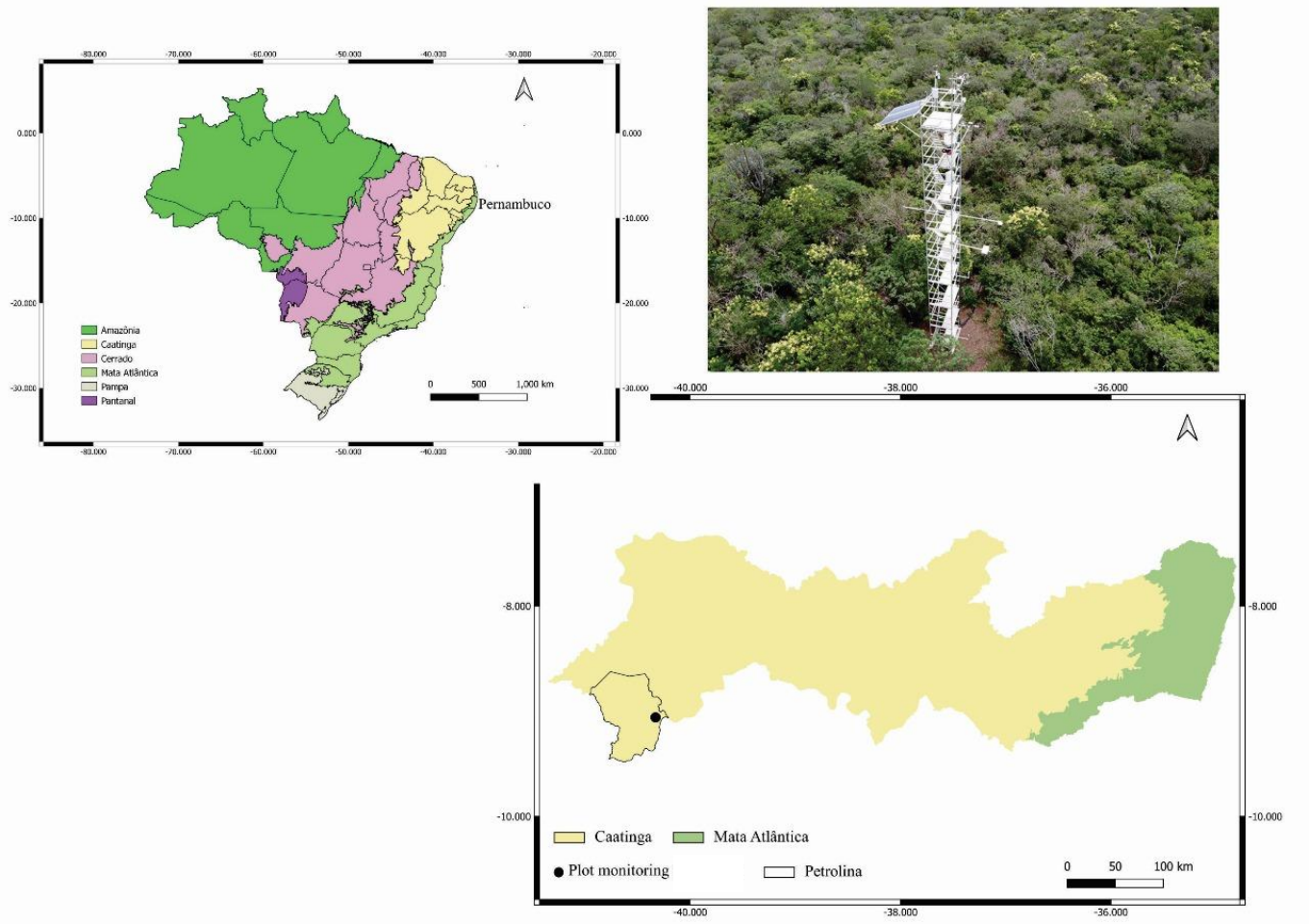
2. Avaliar o efeito da sazonalidade e das variáveis ambientais no sinal de fluxo de seiva das espécies estudadas;
3. Identificar os níveis limiares do potencial mátrico do solo a partir dos quais as espécies alteram seus sinais de fluxo de seiva ao longo dos diferentes períodos sazonais;
4. Investigar se o padrão de fluxo de seiva é consistente entre espécies decíduas ou se há variações interespecíficas, mesmo entre espécies com o mesmo comportamento fenológico;
5. Gerar conhecimento sobre o funcionamento ecohidrológico das espécies da caatinga frente à limitação hídrica, contribuindo para sua inferência sobre sua resiliência a eventos extremos de seca.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

Este estudo foi conduzido na estação experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA SEMIÁRIDO) (09°02’ S; 40°19’ O), situada a 45 km de Petrolina, Pernambuco, Brasil (Figura 4.1). O trabalho foi desenvolvido nos anos de 2018 e 2019. A estação experimental foi instalada em uma área protegida de pastoreio constante e de outros distúrbios antrópicos ao longo dos últimos 40 anos. O terreno é predominantemente plano, cobrindo uma área de aproximadamente 600 hectares. O solo local é classificado como Argissolo Amarelo Eutrófico (SILVA et al., 2018). Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é classificado como BSh - semiárido quente, em baixa latitude e altitude (ALVARES et al., 2013). A estação chuvosa se estende de novembro a abril, enquanto o pico da seca ocorre nos meses de julho, agosto e setembro. Dados climáticos obtidos para o período de indicam precipitação média anual de 435 mm e temperatura média de 32 °C (EMBRAPA, 2025). A vegetação da Caatinga na área de estudo é hiperxerófila, com hábito arbóreo/arbustivo, alcançando de quatro a sete metros de altura, em média (SILVA et al., 2018).

Figura 4.1 - Localização da área de estudo, bioma Caatinga (Embrapa Semiárido), Petrolina - Pernambuco, Nordeste do Brasil.



4.2 Dados meteorológicos

As características microclimáticas da região (precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar e evapotranspiração de referência) foram obtidas a partir dos dados da Estação Agrometeorológica "Estação Caatinga", instalada na área experimental da Embrapa Semiárido, a aproximadamente 2,3 km da área de estudo da presente pesquisa. A estação está equipada com sensores para medida da precipitação (CS700-L, HS Hyquest Solutions), temperatura e umidade relativa do ar (termohigrômetro CS215, Campbell Scientific Inc.). As estações seca, chuvosa e de transição foram definidas com base na distribuição histórica da precipitação média mensal na região de estudo, utilizando dados do período de 1982 a 2019, da Estação Caatinga. Conforme observado, os maiores

volumes de chuva ocorrem entre novembro e abril, sendo este período definido como estação chuvosa. A estação seca corresponde aos meses com os menores índices pluviométricos, de maio a outubro, quando os totais mensais são frequentemente inferiores a 20 mm. O mês de novembro foi considerado, para este estudo, como período de transição, por apresentar início de aumento das chuvas, porém ainda com variabilidade interanual significativa.

A evapotranspiração de referência (ET_0) foi calculada pela equação de Penman-Monteith, com os resultados fornecidos pela EMBRAPA Semiárido. A ET_0, utilizada como indicador da demanda evaporativa atmosférica, representa a taxa de evapotranspiração de uma superfície padrão de grama bem irrigada, sob condições climáticas ideais. Para seu cálculo, foram consideradas variáveis como temperatura do ar (º C), umidade relativa do ar (%), radiação solar (MJ) e velocidade do vento (m/s), conforme a metodologia FAO-56 (Allen et al., 1998).

Dessa forma, a ET_0 reflete exclusivamente a influência das condições climáticas sobre a demanda evaporativa, independentemente das características específicas da vegetação local, sendo adequada para comparar o comportamento da demanda evaporativa ao longo dos diferentes períodos sazonais (seco e chuvoso).

O déficit de pressão de vapor (VPD, na sigla em inglês) é considerado a diferença entre a pressão de saturação do vapor de água e a pressão atual do vapor no ar (AMARAL et al., 2020) e foi calculado pela seguinte equação (Equação 4.1):

$$\text{VPD} = e_s - e_a \qquad (4.1.)$$

Para o cálculo de e_s foi utilizada a equação de Tetens (Equação 4.2), que relaciona a temperatura do ar (T, em °C) com e_s, dada por:

$$e_s = 0{,}6108 \times 10^{\left(\frac{7{,}5 \times Ta}{237{,}3 \times T}\right)} \quad \text{para Ta} \geq 0\ ℃ \qquad (4.2)$$

Onde: e_s é a pressão de saturação (kPa), Ta é a temperatura do ar (°C).

A pressão de vapor atual (e_a) foi obtida como uma função da umidade relativa média (**Ur %)** e da pressão de vapor de saturação (e_s), através da Equação 4.3:

$$e_a = e_s \times \frac{Ur}{100} \quad (4.3)$$

Onde: e_a é a pressão de vapor atual (kPa), e_s é a pressão de saturação (kPa) e Ur é a umidade relativa (%).

4.3 Umidade e potencial mátrico de água no solo

O teor de umidade do solo e o potencial de água no solo foram obtidos, respectivamente, a partir de sensores de umidade volumétrica (modelo 5TM, Decagon Devices, Pullman, WA, EUA) e sensores de potencial mátrico (MPS-6, Decagon Devices, Pullman, WA, EUA) instalados em perfil de solo escavado dentro da parcela de estudo, nas profundidades de 5, 15, 25, 40 e 50 cm. O período de medidas de umidade e potencial de água no solo foi de abril a dezembro de 2018.

As medidas de umidade do solo (m^3/m^3) foram convertidas em conteúdo de água armazenado no perfil do solo (CAS, em mm), por meio da seguinte Equação (4.4):

$$CAS = \theta m * Z \quad (4.4)$$

Onde CAS é a quantidade de água armazenada no solo (em mm), θm é a média mensal do conteúdo de umidade do solo considerando um perfil, e Z é a espessura da camada do solo. Para isso, consideramos a espessura de cada camada do solo representada pela profundidade de inserção de cada sensor. Cada sensor foi posicionado no centro de uma camada específica do solo. Como os sensores medem a umidade em profundidades pontuais (por exemplo, 5 cm, 15 cm, 25 cm, etc.), foi necessário definir a espessura representada por cada sensor. Essa espessura foi determinada pela distância entre os pontos médios

dos sensores adjacentes, garantindo a representação contínua do perfil do solo. O cálculo do armazenamento foi realizado ao multiplicar o conteúdo de umidade volumétrica do solo de cada camada pela respectiva espessura da camada do solo. Os valores obtidos para todas as camadas foram então somados, resultando no total de água armazenada no perfil do solo.

4.4 Levantamento florístico e seleção das espécies

A seleção das espécies a serem estudadas foi baseada em dados do inventário florístico do Projeto Nordeste (FAPESP 2015/50488-5), realizado em uma parcela permanente de 50 x 100 metros (0,5 ha) dentro da unidade da Embrapa Semiárido, em Petrolina. O levantamento florístico incluiu todos os indivíduos arbóreos com diâmetro à altura do peito (DAP) ≥ 5 cm (MOONLIGHT et al., 2020). Um total de 16 espécies, distribuídas em 8 famílias botânicas, foram identificadas na parcela, apresentando uma densidade de 620 indivíduos por hectare, o que corresponde a 310 indivíduos na área de 0,5 ha. Com base nos dados de abundância do levantamento, foram selecionadas, para o presente estudo, cinco espécies de plantas que figuravam entre as dominantes: *Sapium glandulosum* (L.) Morong (28% de dominância), *Senegalia piauhiensis* (Benth.) Seigler & Ebinger (18%), *Manihot carthagenensis* (Jacq.) Müll.Arg. (26%), *Commiphora leptophloeos* (Mart.) Gillet (11%) e *Cenostigma microphyllum* (Mart. ex G.Don) Gagnon & G.P.Lewis (8%) (PALOSCHI, 2020).

De cada espécie, selecionaram-se quatro indivíduos, totalizando 20 árvores amostradas. Destas, 16 indivíduos foram efetivamente monitorados quanto a densidade de fluxo de seiva (FDN), devido a problemas técnicos nos sensores (ver Item 4.8).

A Figura A.1 (Apêndice A) apresenta o esquema metodológico da parcela de 0,5 ha, integrando visualmente os componentes do estudo: monitoramento fenológico foliar, coletas isotópicas e medições de fluxo de seiva, detalhados nas seções seguintes.

4.5 Fenologia foliar

A variação sazonal foliar da vegetação para as espécies vegetais de interesse para o presente estudo foi obtida a partir de dados de EOS (fim da estação de crescimento foliar), SOS (início da estação de crescimento foliar) e LOS (duração da estação foliar) fornecidos por Ramos et al. (2023) para os anos de 2018 e 2019. Essa análise foi realizada para as espécies *Commiphora leptophloeos*, *Manihot carthagenensis*, *Cenostigma microphyllum* e *Sapium glandulosum,* uma vez que o banco de imagens não incluiu a espécie *Senegalia piauhiensis*.

De acordo com Ramos et al. (2023), os dados de EOS, SOS e LOS foram obtidos a partir de séries temporais de imagens de câmeras fenológicas (*Phenocams*) instaladas em diferentes áreas da Caatinga. Uma câmera com lente hemisférica MOBOTIX Q25 (MOBOTIX AG, Alemanha; Alberton et al., 2017) foram posicionadas, verticalmente para baixo (180º) a 10 m de altura acima da superfície, voltadas para o lado leste da área de pesquisa. As câmeras foram programadas para capturar imagens diárias, variando de três a quatro imagens, nos primeiros 5 minutos de cada hora, das 06:00 às 18:00 (UC-3; Tempo Universal Coordenado). A partir dessas imagens, foram determinados os padrões de brotação, senescência e duração da estação de crescimento das folhas. A utilização desses dados permitiu avaliar tendências temporais na fenologia foliar e comparar os padrões de fluxo de seiva com as fontes de água utilizadas pelas mesmas espécies na área de estudo. Para as análises de dados, foram utilizadas réplicas das espécies, cerca de 15 indivíduos por espécie. Vale salientar que os indivíduos observados pela *phenocam*, apesar de estarem na mesma área de estudo, não coincidem com aqueles indivíduos utilizados nas análises apresentadas em outras seções deste trabalho. Para a análise da variabilidade dos eventos sazonais, foram considerados os dias em que a vegetação apresentou brotação foliar (início da estação) ou perda de folhas (fim da estação), permitindo identificar os períodos de atividade e dormência foliar. Mais detalhes sobre a metodologia de aquisição e processamento dos dados de EOS, SOS e LOS, podem ser vistos em Ramos et al. (2023).

4.6 Coletas de amostras isotópicas

Para as análises isotópicas ($\delta^{18}O$ e $\delta^{2}H$) foram coletadas amostras de água de solo e de plantas nos meses de março de 2018 (período úmido), junho de 2018 (período seco) e novembro de 2018 (transição entre o período seco e úmido).

Amostras de água da chuva foram coletadas apenas em março de 2018 (repetida em todas as análises estatísticas), utilizando cinco coletores do tipo "funnel ball" (PRECHSL et al., 2014), conforme recomendado pela Rede Global de Isótopos em Precipitação (GNIP, 2019). Esses coletores consistiam em um funil acoplado a um frasco de vidro, protegido por uma tampa metálica para evitar evaporação indesejada. Foi adicionado vaselina líquida para evitar a evaporação da água. Após cada evento de chuva, as coletas eram realizadas imediatamente, e as amostras eram armazenadas em um refrigerador a aproximadamente 4 °C. Posteriormente, as amostras foram transferidas para frascos de vidro de 1,5 ml para análises isotópicas. Esse processo de transferência foi realizado com o uso de uma seringa com agulha, acoplada a um filtro hidrofílico de PTFE com diâmetro de poro de 0,22 µm, capaz de eliminar possíveis impurezas e microrganismos (SANTOS et al., 2021).

As amostras de solo foram coletadas com trados manuais em três perfis de solo nas profundidades de 5, 15, 30, 40, 50 e 60 cm, para cada período indicado (seco, chuvoso e transição). Posteriormente, essas profundidades foram categorizadas em rasa (0 – 30 cm), intermediária (40 – 50 cm) e profunda (≥ 60 cm). As amostras de solo foram coletadas em locais próximos às árvores monitoradas dentro da parcela e nas imediações dos perfis de monitoramento de umidade e potencial mátrico do solo.

Para a análise isotópica da água do xilema, foi coletado um pequeno segmento de galhos suberizados (com até 2 cm de diâmetro) dos 20 indivíduos estudados. A casca foi removida de cada segmento para evitar a contaminação cruzada entre a água do floema e a água do xilema (BORMA et al., 2022). Essas amostras de plantas foram coletadas simultaneamente às coletas de solo. As amostras de solo e das plantas foram acondicionadas em tubos de Falcon e imediatamente seladas com parafilme, mantidas refrigeradas durante o trabalho

de campo e congeladas no laboratório até a realização da extração da água. Em laboratório, a extração foi feita por criogênese a vácuo, utilizando o extrator LICA, modelo LI-2100. A amostra foi aquecida a 195 °C, e a água extraída foi congelada a -90 °C (AUTOMATIC WATER EXTRACTION SYSTEM BEIJING UNITED TECHNOLOGY LIMITED, 2024).

4.7 Determinação da assinatura isotópica

As razões isotópicas de H (δ^2H) e O ($\delta^{18}O$) (COPLEN, 2011) para amostras de água de chuva, solo e planta foram determinadas no Laboratório de Ecohidrologia Isotópica (LabEcoh) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), localizado em São José dos Campos, Brasil. As medições foram realizadas utilizando um Espectrômetro de Cavidade Ressonante (Cavity Ring-Down Spectrometer) Picarro (modelo L2130-I). Para garantir a precisão das análises, foram utilizados padrões fornecidos pelo fabricante, que incluíam valores de referência para zero ($\delta^{18}O$ 0,3 ± 0,2‰; δ^2H 1,8 ± 0,9‰), médio ($\delta^{18}O$ −20,6 ± 0,2‰; δ^2H −159,0 ± 1,3‰) e deplecionado ($\delta^{18}O$ −29,6 ± 0,2‰; δ^2H −235,0 ± 1,8‰). Para cada amostra e padrão, foram realizadas seis injeções, com as três primeiras descartadas para evitar qualquer efeito de memória. As três últimas injeções foram utilizadas para normalização e cálculo da média aritmética, fornecendo os resultados finais das análises. As razões isotópicas foram expressas em por mil (‰) usando a notação δ, em relação ao Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW) (Equação 4.5):

$$\delta = \left(\frac{R_{amostra}}{R_{padrão}} - 1\right) \times 1000 \quad (4.5)$$

Onde: δ é o valor delta (‰), $R_{amostra}$ é a razão isotópica do elemento na amostra (por exemplo, $^{18}O/^{16}O$ ou $^{2H}/^{1}H$) e $R_{padrão}$ é a razão isotópica do padrão (no caso, o V-SMOW). O fator 1000 converte o valor em por mil (‰).

4.8 Medida do fluxo de seiva

Os dados de densidade de fluxo de seiva (FD) utilizados neste estudo foram originalmente coletados e processados por Paloschi (2020). As medidas de densidade de fluxo de seiva (FD) foram realizadas utilizando sensores de fluxo de seiva instalados nos troncos de 16 indivíduos dentro da parcela de estudo. As medidas de fluxo de seiva foram realizadas de março de 2018 a abril de 2019.

Os sensores de fluxo de seiva utilizados avaliam o uso de água pelas plantas com base no método de dissipação de calor (TDP, da sigla em inglês) (GRANIER, 1987). Este método mede a densidade do fluxo de seiva que passa por um ponto de área conhecido no xilema da árvore. Duas sondas foram instaladas no tronco das árvores, separadas por 10 a 15 cm e em contato com o xilema. A sonda superior foi equipada com uma resistência elétrica, aquecida a uma potência constante, enquanto a sonda inferior permaneceu à temperatura da árvore. O princípio de funcionamento do método baseia-se no fato de que o fluxo de seiva resfria a sonda superior, diminuindo assim a diferença de temperatura entre as sondas aquecida e não aquecida (ΔT, °C), tornando a Fd inversamente proporcional a essa diferença de temperatura. Maiores detalhes podem ser obtidos em Granier et al., (1985 e 1987) e Paloschi et al., (2021, material suplementar).

Segundo Paloschi et al. (2021), os resultados das análises estatísticas do fluxo de seiva normalizado (FDN) basearam-se na média dos fluxos de seiva dos 4 indivíduos arbóreos previamente selecionados, resultando um valor médio de FDN (adimensional) para cada espécie. O valor resultante estará em uma escala de 0 a 1, onde: 0 corresponde ao valor mínimo de fluxo de seiva, 1 corresponde ao valor máximo de fluxo de seiva. Isso significa que os resultados aqui apresentados se referem às variações sazonais e temporais do fluxo de seiva, sem detalhar a quantidade total de água utilizada por cada árvore em termos absolutos (por exemplo, em litros por dia ou por ano).

4.9 Análises estatísticas

4.9.1 Estatística circular (Fenologia foliar)

Para investigar a sazonalidade da fenologia foliar (fenofases) em relação às fontes de água utilizadas e aos fluxos de seiva, empregou-se estatística circular, utilizando o teste de Rayleigh. Para isso, seguimos os seguintes procedimentos foi o seguinte: Para cada ano de observação, calculamos a frequência de ocorrência do evento fenológico para o total das espécies por mês. Os meses foram convertidos em ângulos, onde 0° = janeiro**,** 30° = fevereiro**,** e assim sucessivamente até 330° = dezembro, com intervalos de 30° entre cada mês. Com base nessa conversão, calculamos o ângulo médio (μ), que representa a direção média das ocorrências; o desvio padrão angular, que indica a dispersão dos dados; e o comprimento do vetor (r), que reflete a concentração dos dados em torno da média circular. A significância do ângulo médio foi testada por meio do teste de Rayleigh (z) para distribuição circular (ZAR, 1999).

As fenofases que apresentaram um ângulo médio significativo ($p < 0,05$) foram convertidas em data média, ou seja, a data de maior intensidade da fenofase durante o ano. Essa abordagem permitiu identificar os períodos de maior atividade fenológica para cada espécie.

A análise de estatística circular foi processada utilizando o software Past – Palaeontological Statistics, versão 5.1 (HAMMER et al., 2024). Após a inserção da matriz de dados no programa, os seguintes comandos foram executados: Geometry - Directional Analysis.

4.9.2 Sinal isotópico da água

Para avaliar a relação entre δ^2H (‰), $\delta^{18}O$ (‰) e as fontes de água utilizadas pela vegetação em diferentes períodos, foram construídos modelos lineares gerais, tendo δ^2H (‰) como variável dependente e $\delta^{18}O$ (‰) e as fontes de água como variáveis independentes. Um modelo foi elaborado para cada período. Como não possuíamos dados de precipitação (Linha Meteórica Local - LMWL) para o período seco, devido à falta de chuva na região, os dados de LMWL foram replicados em todos os períodos.

A suposição de normalidade dos resíduos foi investigada por meio de gráficos diagnósticos e considerada atendida. As inclinações das linhas para as diferentes fontes de água foram comparadas incluindo uma interação entre $\delta^{18}O$ (‰) e as fontes de água na construção do modelo. Modelos com interações significativas foram submetidos à comparação pareada das inclinações de cada fonte de água. Para esse propósito, utilizou-se a função "emtrends" do pacote "emmeans" (LENTH, 2023).

Para comparar os valores de $\delta^{2}H$ (‰) e $\delta^{18}O$ (‰) entre diferentes fontes de água em cada período, foram construídos modelos ANOVA unidirecionais, com $\delta^{2}H$ (‰) ou $\delta^{18}O$ (‰) como variáveis dependentes e a fonte de água como variável independente. A suposição de normalidade dos resíduos foi investigada por meio de gráficos diagnósticos e considerada atendida. Modelos ANOVA estatisticamente significativos foram seguidos pelo teste post-hoc de Tukey. Todas as análises estatísticas foram conduzidas no software R (R CORE TEAM, 2023).

4.9.3 Fluxo de seiva

Para avaliar como o fluxo de seiva das espécies varia em relação a sazonalidade climática da Caatinga realizamos testes não paramétricos e correlações lineares e não lineares com as variáveis climáticas. Todas as variáveis coletadas foram submetidas a análises descritivas. Para as variáveis categóricas, foram calculadas as frequências absolutas (n) e relativas (%). Para as variáveis numéricas, calculou-se a média, a mediana, o desvio-padrão, os quartis 1 e 3 (que equivalem, respectivamente, aos percentis 25 e 75) e os valores mínimo e máximo (KAUR; STOLTZFUS; YELLAPU, 2018).

Para comparar os valores de FDN de cada espécie entre os períodos seco e chuvoso, foram utilizados testes não-paramétricos de Mann-Whitney. Os testes não-paramétricos foram utilizados devido à não-normalidade dos valores de FDN. Dado o impacto do tamanho da amostra no valor de p (SULLIVAN; FEINN, 2012), para todos os testes foram calculadas medidas de tamanho de efeito. Para o teste de Mann-Whitney, calculou-se o tamanho de efeito r (FRITZ; MORRIS; RICHLER, 2012), que pode ser classificado como: pequeno ($r > 0,1$),

médio (r > 0,3) ou grande (r > 0,5) (COHEN, 1988). As relações entre VPD e conteúdo de água no solo (CAS), bem como entre FDN, VPD, CAS. Para todas essas relações foram construídos modelos lineares e não-lineares e o modelo com menor valor de AIC foi considerado mais adequado. Os modelos não-lineares log-logísticos foram construídos com a função “nls” e o modelo “SSlogis”, que providencia os valores iniciais, ambos do pacote base do software R (R CORE TEAM, 2023). Essas mesmas análises foram conduzidas para avaliar a relação, em cada período, entre FDN (média de todas as espécies) e VPD e entre FDN e CAS. Essa análise foi também realizada para avaliar a relação entre os valores de FDN de cada espécie, em cada período, e o valor médio de potencial mátrico (PM médio) (considerando-se todas as profundidades).

Para as análises integradas entre fluxo de seiva e variáveis ambientais (VPD, CAS e PM), foram considerados os dados coletados no período de abril a dezembro de 2018, correspondente ao intervalo de medição simultânea de todas as variáveis.

Todas as análises foram conduzidas no software R versão 4.3.3 (R CORE TEAM, 2023) e consideraram um nível de significância (α) de 5%.

5 RESULTADOS

5.1. Climatologia da área de estudo

5.1.1 Precipitação histórica

A precipitação acumulada anual no período de 1982 a 2019, obtida da Estação Caatinga, está apresentada na Figura 5.1, com uma média histórica anual de 475,15 mm/ano. A maior média mensal (89,26 mm) ocorreu no ano hidrológico de 1985, que teve um acumulado anual de 1071,10 mm, enquanto a menor média mensal (11,98 mm) ocorreu em 2012, com um acumulado de 144 mm. Em relação aos anos estudados (2018 e 2019), o ano de 2018 apresentou uma precipitação acumulada de 350 mm e uma média mensal de 29,21 mm, enquanto 2019 teve um acumulado de 212 mm e uma média mensal de 17,66 mm. Ambos os anos ficaram abaixo da média histórica, mas 2019 foi consideravelmente mais seco que 2018. Dessa forma, 2018 pode ser considerado um ano relativamente próximo da normalidade climática da região.

A análise das médias mensais históricas (1982–2019) revela que a precipitação é mais intensa nos primeiros meses do ano, com pico em março (107,30 mm/mês), seguido por janeiro (81,47 mm/mês), fevereiro (72,90 mm/mês) e abril (62,64 mm/mês), que somam cerca de 68,2% da precipitação anual média (Figura 5.2). Após abril, há um declínio acentuado nos volumes mensais, atingindo os valores mais baixos em agosto (2,61 mm/mês) e setembro (2,52 mm/mês), caracterizando a estação seca. A precipitação começa a aumentar novamente de outubro (10,40 mm/mês) a dezembro (52,57 mm/mês), marcando o início do período chuvoso. O regime de chuvas da região é sazonal, com maior precipitação nos primeiros meses do ano, e um período chuvoso de novembro a abril, semelhante ao observado em outras áreas do Sertão nordestino (SANTOS et al., 2021). Esse ciclo é seguido por uma estação seca de maio a outubro. Para este estudo, considerou-se o ano hidrológico de outubro a setembro, refletindo a transição da estação seca para a recarga hídrica no solo.

Figura 5.1 - Precipitação acumulada (mm) ao longo dos meses, para os anos de 2019 (em vermelho), 2018 (em azul) e para o período de 1982 a 2017 (em cinza). A média de precipitação no período de 1982 a 2019 está representada pela linha preta., obtidos a partir dos registros da Estação Caatinga. Dados cedidos pela Embrapa Semiárido.

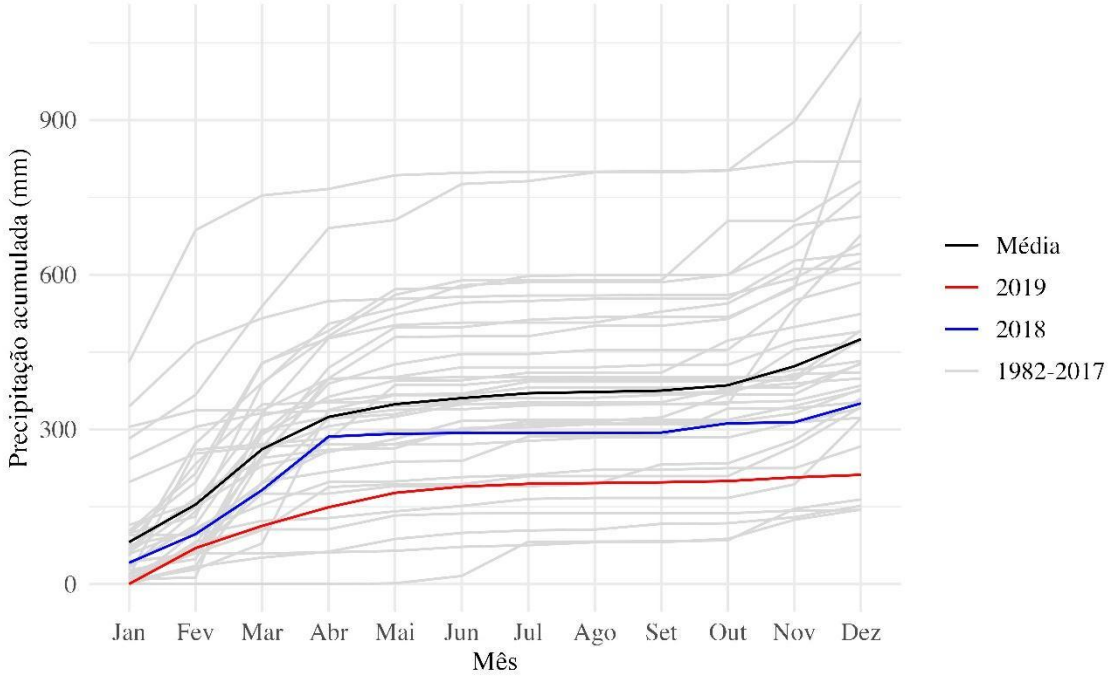
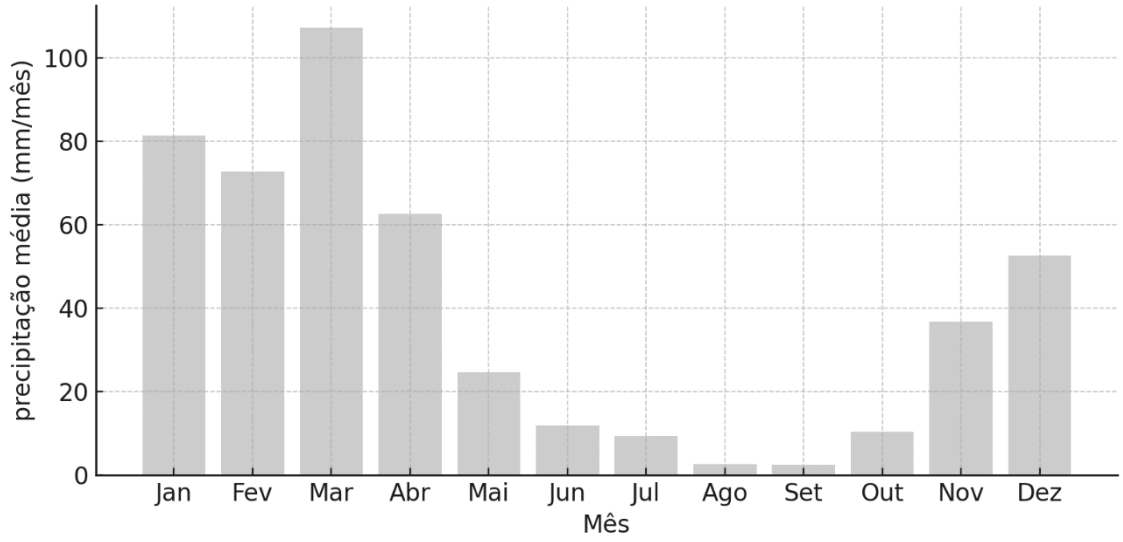


Figura 5.2 - Distribuição da precipitação média mensal (mm/mês) ao longo do ano, calculada com base nos totais mensais médios do período de 1982 a 2019, obtidos a partir dos registros da Estação Caatinga. Dados cedidos pela EMBRAPA.



5.1.2 Evapotranspiração de referência (ET_0), Déficit de pressão de vapor (VPD) Conteúdo de água no solo (CAS) e potencial mátrico do solo (Ψm - PM)

Os valores diários da evapotranspiração de referência (ET_0), foi de 1.9 mm (mínimo) e 6.5 mm (máximo), enquanto a média móvel de 5 dias variou de aproximadamente 4,1 a 5,6 mm ao longo de 2018. Na média, a ET_0 anual de 2018 foi de 4.62 mm (Figura 5.3).

O déficit de pressão de vapor (VPD) apresentou valores diários variando entre 0,45 e 3,3 kPa, com sua média móvel oscilando entre aproximadamente 1,0 e 2,0 kPa ao longo de 2018. Durante o período chuvoso (novembro–abril), os valores médios de VPD foram de cerca de 1,36 kPa, refletindo a maior disponibilidade hídrica atmosférica. No período seco (maio–outubro), a média sazonal do VPD foi de 1,48 kPa, atingindo picos superiores a 2,0 kPa nos meses mais críticos da seca (agosto–setembro). A partir de novembro, o VPD voltou a declinar, sinalizando o início da transição para a estação úmida. O VPD apresentou um padrão sazonal bem definido (Figura 5.3), condizente com o padrão observado para a evapotranspiração de referência (ET_0), como era esperado para ecossistemas tropicais sazonais.

Figura 5.3 - VPD e ET_0 ao longo do tempo. Os valores de VPD e ET_0 médios correspondem à média móvel dessas medidas, considerando-se um período de 5 dias.

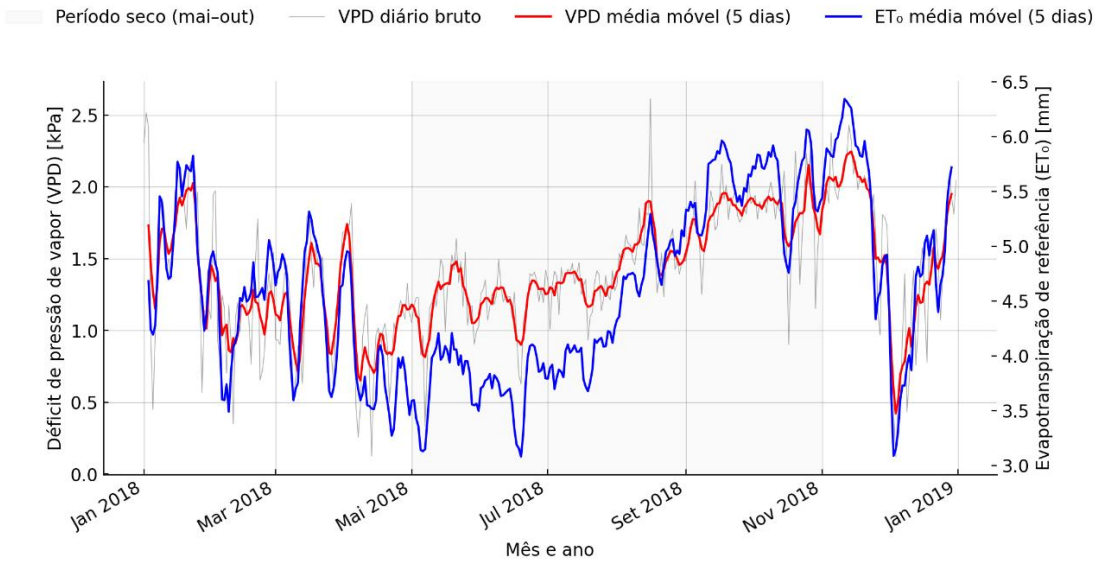
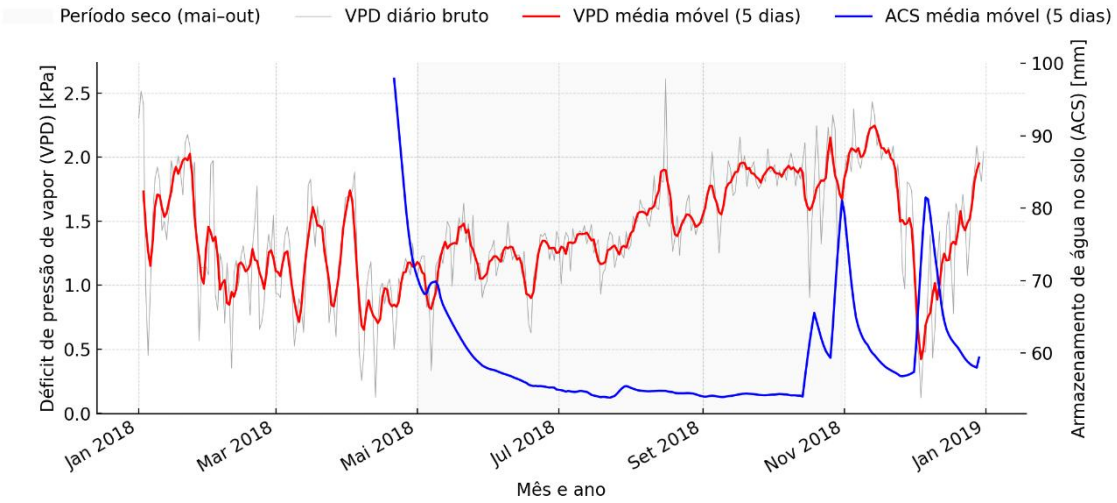


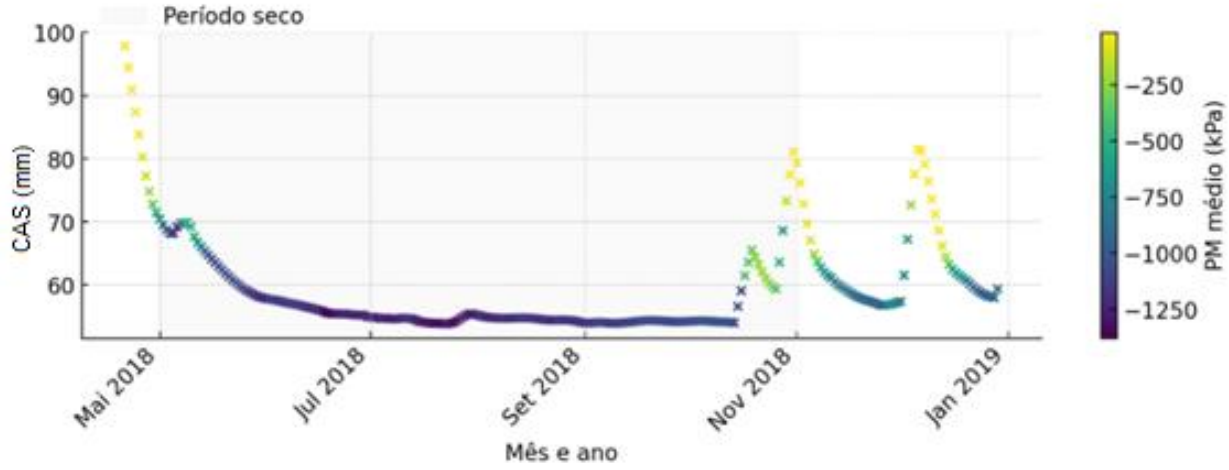
Figura 5.4 - Valores de VPD e CAS ao longo do tempo. Os valores de VPD e CAS médios correspondem à média móvel dessas medidas, considerando-se um período de 5 dias. O sombreamento cinza claro indica o período seco (maio–outubro).



O conteúdo de água no solo (CAS) apresentou os menores valores no período de maio a outubro de 2018, coincidindo com o período de seca na região (Figura 5.4). O CAS apresentou variação mínima durante os meses secos, permanecendo praticamente constante entre 55 e 65 mm, de acordo com a média móvel. A partir do final de outubro os valores aumentam para aproximadamente 80 mm em todo o perfil do solo (Figura 5.4). O CAS mostrou um padrão inverso ao do VPD demonstrando que períodos de alta demanda evaporativa coincidem com menores níveis de conteúdo de água do solo, de acordo com o período seco para a Caatinga. Em 2018, potencial mátrico médio do solo, ou seja, a média do potencial medido em todas as profundidades (Ψm médio) variou de –11,9 kPa (solo na condição próxima da saturação) a –1377,6 kPa (solo extremamente seco).

Durante a estação seca (maio a outubro), Ψm médio (PM) manteve-se predominantemente abaixo de –1000 kPa, indicando solo muito seco (Figura 5.5). Como era de se esperar, o aumento do potencial mátrico (ou seja, valores de Ψm muito negativos) foi acompanhado por uma redução no CAS, que caiu progressivamente até estabilizar-se próximo de 55 mm (Figura 5.5).

Figura 5.5 - CAS ao longo do tempo, colorido pelo PM médio do solo. Os valores de CAS correspondem à média móvel de cinco dias e o sombreamento cinza claro indica o período seco (maio–outubro). A cor dos marcadores representa o potencial matricial médio do perfil do solo (kPa).



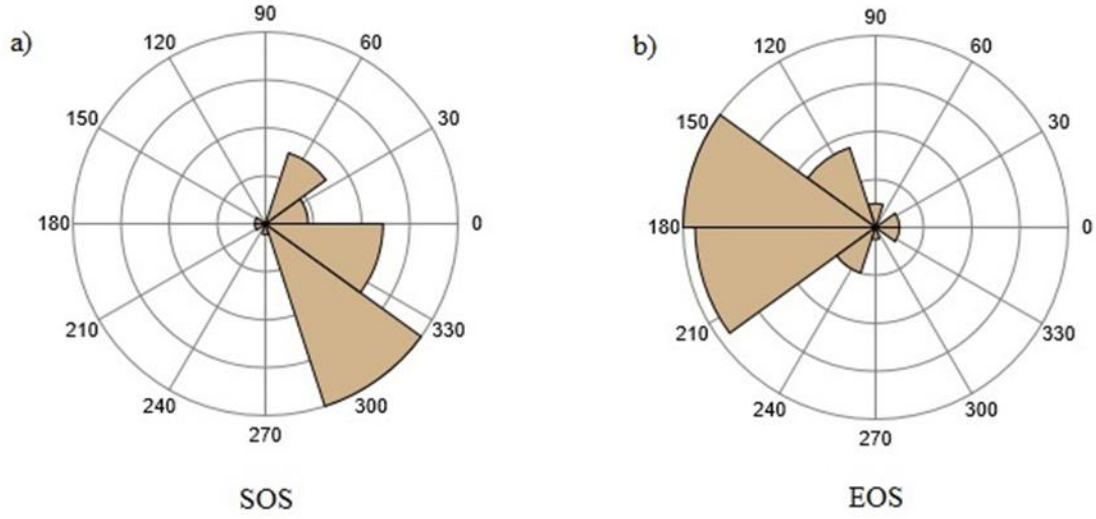
5.2 Fenologia foliar da vegetação

A análise estatística circular, no geral, demonstrou diferenças na direção média dos eventos entre SOS (início da estação de crescimento foliar) e EOS (fim da estação de crescimento foliar), sugerindo padrões sazonais. No caso de SOS, a direção média foi 338,6°, com um intervalo de confiança de 95% entre 329,4° e 347,8°, indicando uma forte concentração da estação de crescimento nos períodos finais de 30 de novembro a 19 de dezembro, ou seja, período chuvoso. O valor de kappa (2,1804) indica que os eventos de SOS estão concentrados no período chuvoso, sugerindo que esses eventos seguem um padrão direcional bem definido. Além disso, os testes estatísticos indicaram que a distribuição de SOS não é uniforme (Rayleigh: $p = 1{,}78 \times 10^{-10}$; Rao: $p = 0$; Qui-quadrado: $p = 7{,}39 \times 10^{-10}$), reforçando a ideia de que esses eventos ocorrem preferencialmente em uma determinada direção, neste caso, no período chuvoso (Figura 5.6, a).

Para EOS, a direção média foi 171,67°, correspondente ao dia 23 de junho, esta data concentra a maior parte dos eventos de finalização do ciclo fenológico, com intervalo de confiança entre 148,7° e 194,6°, respectivamente 31 de maio a 15 de julho, indicando que esses eventos apresentam uma orientação espacial

significativamente diferente de SOS. A concentração dos dados foi um pouco menor (kappa = 1,7347), sugerindo que, apesar de haver um padrão direcional, ele é menos restrito. Os testes estatísticos também mostraram que a distribuição de EOS é significativamente não uniforme (Rayleigh: p = 5,58 × 10^{-10}; Rao: p = 0; Qui-quadrado: p = 3,13 × 10^{-9}), indicando a existência de uma direção preferencial bem definida de acordo com a sazonalidade (período seco) e influências ambientais do bioma Caatinga (Figura 5.6, b).

Figura 5.6 - Histogramas circulares das datas de transição (TDs) representando, (a) o início da estação foliar (SOS) e (b) o fim da estação foliar (EOS) para o sítio de Petrolina, calculados a partir da série temporal 2018 a 2019. DOY representa o ângulo médio convertido para o dia do ano (0 = janeiro; 180 = junho).



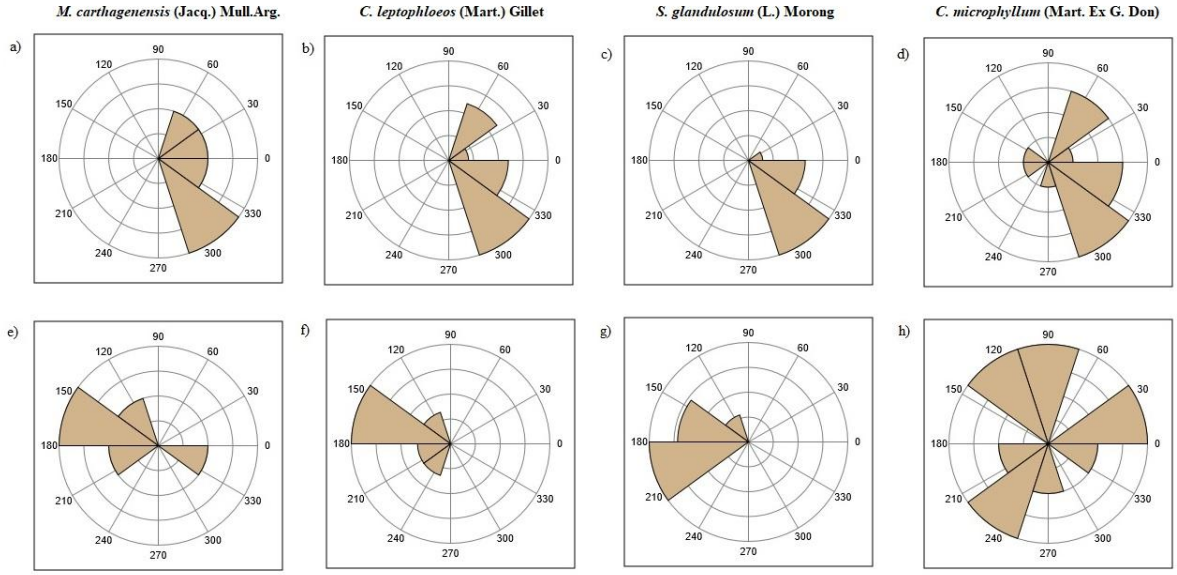
Em relação a cada espécie, as datas de transição para o início da estação foliar (SOS) e fim da estação foliar (EOS) entre os anos de 2018 e 2019 foram sazonais para todas as espécies estudadas, exceto para a espécie *C. microphyllum*, que demonstrou padrão variado ao longo dos anos, conforme indicado pela significância do teste de Rayleigh (p) (Figura 5.7, d).

Para *M. carthagenensis*, o SOS (μ = 350,4°; DOY 356) apresentou agregação moderada (κ = 1,725) e distribuição não uniforme (Rayleigh: p = 0,021), indicando que o crescimento foliar ocorre predominantemente em dezembro, coincidindo com o período de chuvas. O EOS (μ = 149,38°; DOY 149) mostrou

maior dispersão (κ = 0,882) e ausência de padrão direcional significativo (Rayleigh: p = 0,277), com eventos de queda foliar distribuídos entre fevereiro e agosto (Figura 5.7 – a, e) Para *S. glandulosum*, o SOS (μ = 329,48°; DOY 325) apresentou agregação alta (κ = 5,628) e distribuição não uniforme (Rayleigh: p = $2,63 \times 10^{-6}$), ocorrendo sincronicamente entre 12 e 30 de novembro, indicando respostas sincronizadas ao início das chuvas. O EOS (μ = 175,09°; DOY 175) também mostrou sincronia elevada (κ = 4,672; Rayleigh: p = $9,73 \times 10^{-7}$), com eventos concentrados em junho, mas variando de maio a julho, indicando senescência foliar coletiva no período seco (Figura 5.7 – c, g).

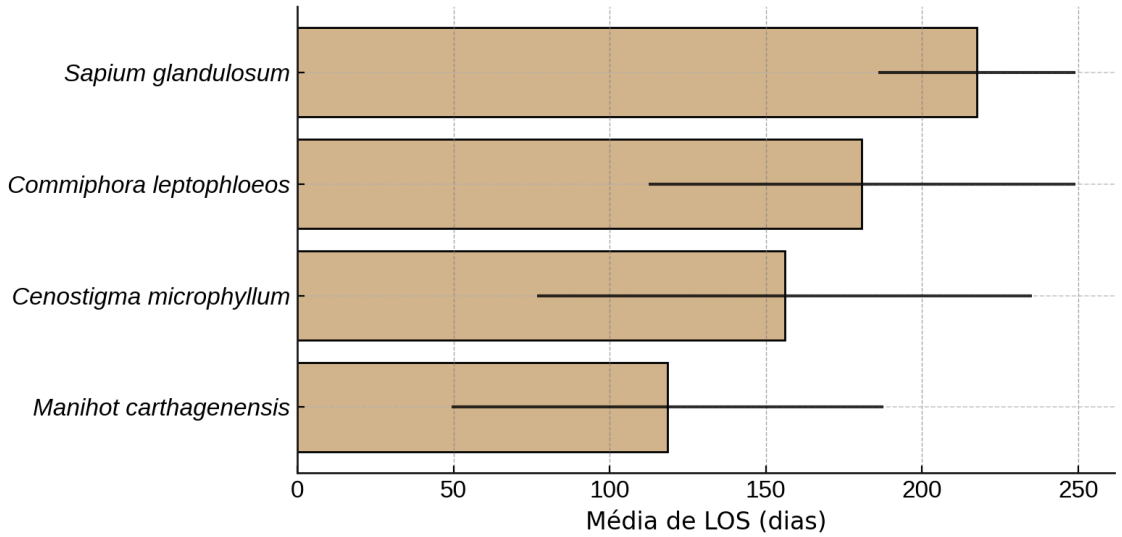
Para *C. leptopholoeos* o SOS (μ = 349,23°; DOY 355) apresentou agregação moderada-alta (κ = 1,897) com padrão temporal significativamente não uniforme (Rayleigh: p = 0,00031), ocorrendo predominantemente entre 9 e 24 de dezembro, com janela relativamente estreita de 15 dias no período chuvoso. O EOS (μ = 171,92°; DOY 172) demonstrou maior sincronia (κ = 3,261; Rayleigh: p = $1,9 \times 10^{-6}$), concentrando-se em junho, mas com variação de meados de maio a final de julho (Figura 5.7 – b, f). Em contraste, a *C. microphyllum*, com SOS (μ = 332,4°; DOY 328) apresentou baixa agregação (κ = 1,076) com padrão temporal marginalmente não uniforme (Rayleigh: p = 0,023), ocorrendo entre outubro e dezembro. O EOS não demonstrou padrão sazonal claro (κ ≈ 0; Rayleigh: p = 0,958), com eventos distribuídos aleatoriamente ao longo do ano (Figura 5.7 – d, h).

Figura 5.7 - Histogramas circulares por espécies das datas de transição (TDs) representando, (a - d) o início da estação foliar (SOS) e (e- h) o fim da estação foliar (EOS) entre as espécies para o sítio de Petrolina, calculados a partir da série temporal 2018 a 2019. DOY representa o ângulo médio convertido para o dia do ano (0 = janeiro; 180 = junho).



Em relação a duração do estágio fenológico (LOS), observou-se que *S. glandulosum* apresenta o maior período de duração, ou seja, maior período com folhas, com uma média de 218 dias, indicando que essa espécie possui uma fenologia mais prolongada. Isso sugere que *S. glandulosum* mantém suas folhas e seu metabolismo funcionando por um tempo significativamente maior. Por outro lado, *M. carthagenensis* apresentou o menor período de LOS, com uma média de 118 dias, sugerindo uma fenologia mais curta (Figura 5.8).

Figura 5.8 - Duração média do estágio fenológico foliar (LOS) das espécies *Manihot carthagenensis, Cenostigma microphyllum, Commiphora leptophloeos e Sapium glandulosum* entre 2018 e 2019. Cada barra horizontal indica a média de LOS (em dias do ano) calculada a partir de 4 a 11 indivíduos por espécie. As barras de erro correspondem a ±1 desvio-padrão (SD).



5.3 Isótopos de água

5.3.1 Caracterização isotópica da água da chuva, solo e do xilema

Durante o período de amostragem, os valores isotópicos da água da chuva variaram de −36,85 a 22,34‰ para δ^2H, com média de −1,96 ± 16,40‰. Para $\delta^{18}O$, os valores oscilaram entre −6,27 e 1,60‰, com média de −1,61 ± 2,06‰. A água do solo apresentou valores de δ^2H entre −38,84 e 4,26‰ (média = −8,55 ± 9,56‰), enquanto os valores de $\delta^{18}O$ variaram de −2,87 a 6,84‰, com média de 2,14 ± 2,63‰. Comparado à água da chuva, a água do solo mostrou-se mais deplecionada em δ^2H e mais enriquecida em $\delta^{18}O$. Os maiores valores isotópicos (ou seja, os valores mais enriquecidos) foram observados na água do xilema. Os valores de δ^2H variaram de −5,02 a 40,27‰, com média de 8,11 ± 8,50‰, e os de $\delta^{18}O$ de 0,55 a 24,18‰, com média de 6,01 ± 4,33‰. De forma geral, esses resultados indicam um padrão consistente de enriquecimento isotópico na água do xilema em relação às demais fontes, tanto para δ^2H quanto para $\delta^{18}O$ (Figura 5.9; Tabela 5.1).

Figura 5.9 - Boxplots dos valores de (a) δ^2H e (b) $\delta^{18}O$ em todos os períodos (períodos úmidos, de transição e secos) das diferentes fontes de água: chuva, xilema de cinco espécies vegetais e solo em três profundidades (0–30 cm, 40–50 cm, ≥ 60 cm). As caixas mostram a mediana (linha preta), os quartis (caixa), extremos (linhas) e outliers (pontos). A ordem vertical reflete o gradiente hidrológico: chuva no topo, seguida pelas espécies e solo ao final.

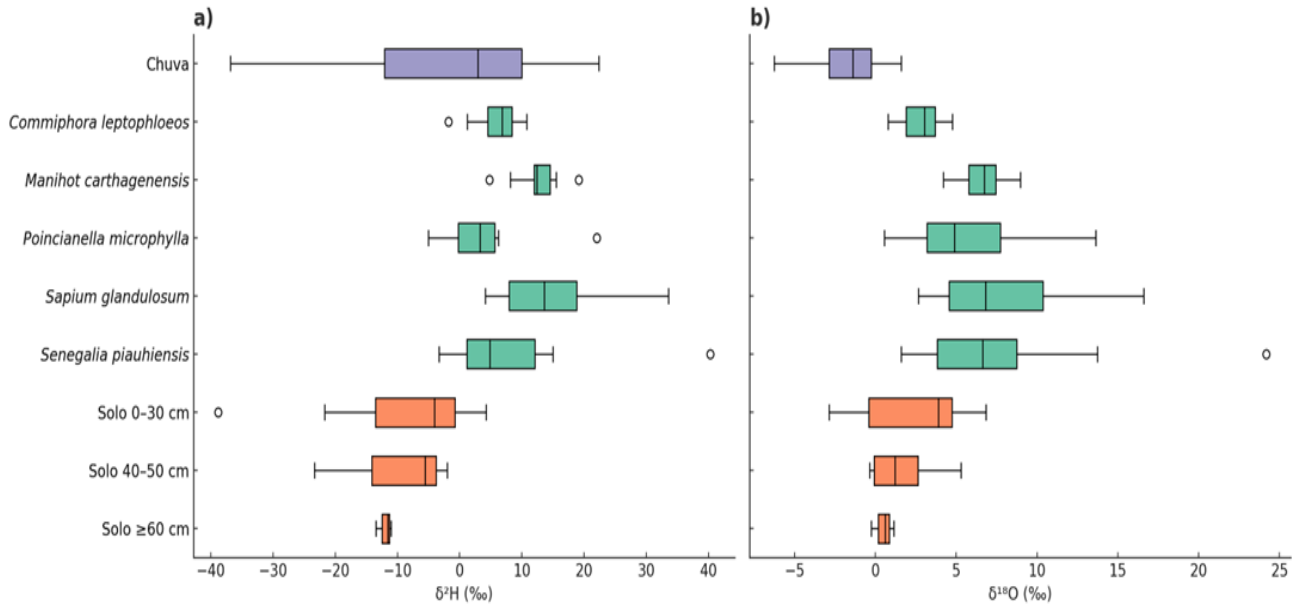


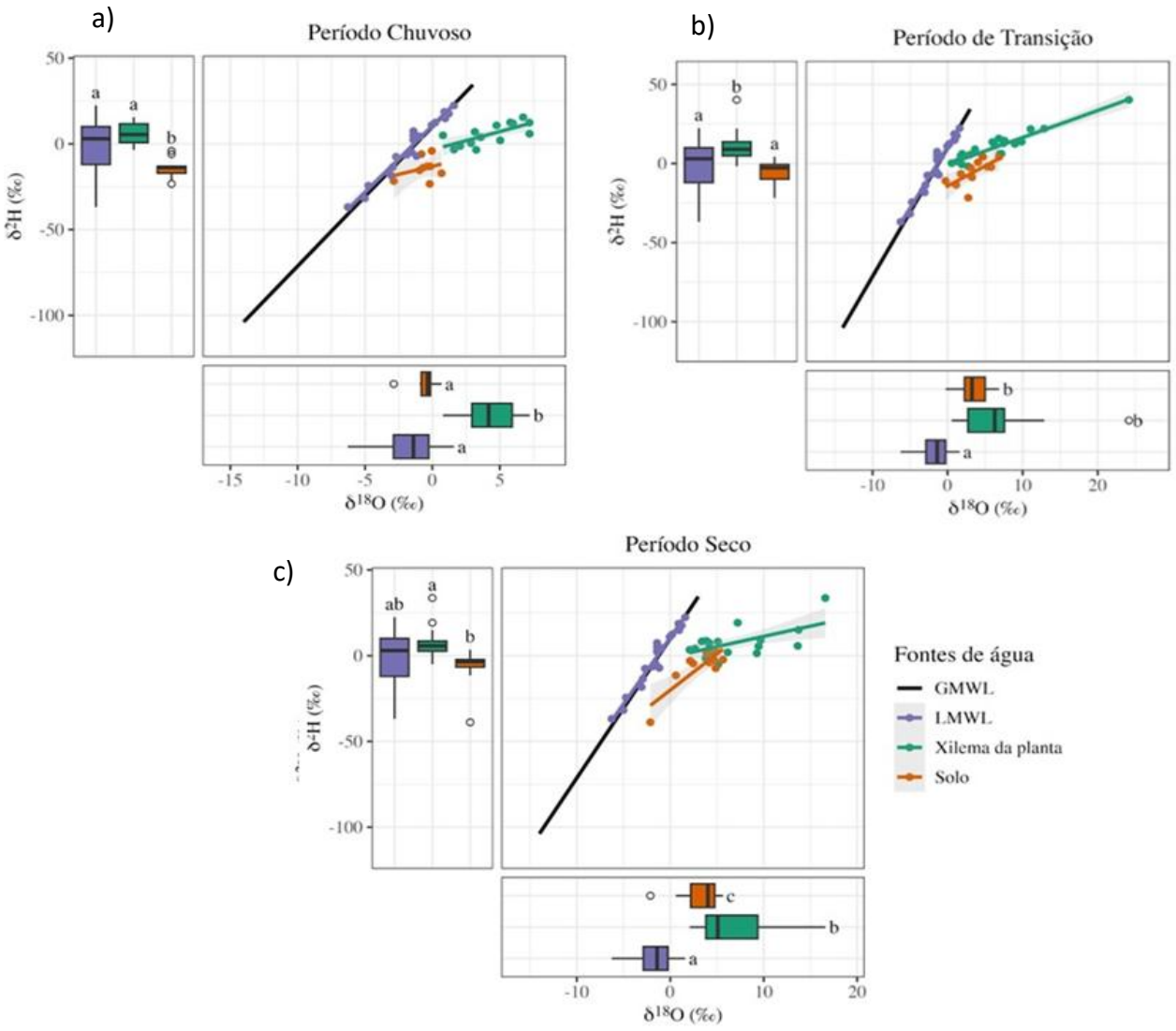
Tabela 5.1 - Valores mínimos, máximos e médios (± desvio padrão) dos isótopos estáveis de hidrogênio (δ^2H) e oxigênio ($\delta^{18}O$) em diferentes fontes de água (chuva, solo e xilema) coletadas ao longo do período de estudo. Os valores representam a variação na composição isotópica da água associada a cada compartimento, com o número total de amostras (N) indicado para cada tipo de amostra.

		δ^2H			$\delta^{18}O$		
Fonte	**N**	**Min**	**Max**	**Média ± dp**	**Min**	**Max**	**Média ± dp**
LMWL	22	-6272	1597	-1.61 ± 2.06	-36.85	22338	-1.96 ± 16.40
Xilema	54	0.548	24177	6.01 ± 4.33	-5019	40269	8.11 ± 8.50
Solo	30	-2866	6843	2.14 ± 2.63	-38.84	4255	-8.55 ± 9.56

5.3.2 Distribuição isotópica no espaço dual (δ^2H vs. $\delta^{18}O$) ao longo dos períodos sazonais

No espaço isotópico dual nos períodos chuvoso, de transição e seco (Figura 5.10), os sinais isotópicos da água do xilema se posicionaram abaixo da Linha Meteorológica Local da Água da chuva (LMWL), apresentando maior enriquecimento em $\delta^{18}O$ e δ^2H em comparação às demais fontes.

Figura 5.10 - Relação entre $\delta^{18}O$ (‰) e δ^2H (‰) de acordo com as fontes de água e gráficos boxplot para os valores de $\delta^{18}O$ (‰) e δ^2H (‰) de acordo com as fontes de água. Letras distintas indicam grupos que diferem estatisticamente entre si, de acordo com o post-hoc de Tukey. Dados referentes ao período chuvoso (a), de transição (b) e seco (c).



Nos três períodos sazonais avaliados (seco, de transição e úmido), observou-se interação significativa entre $\delta^{18}O$ (‰) e as diferentes fontes de água (xilema, solo e LMWL), conforme indicado pelos testes de ANOVA (Tabela 5.2). Todas as fontes apresentaram correlações lineares estatisticamente significativas entre $\delta^{18}O$ e $\delta^{2}H$, com inclinações distintas (Tabela A.1). As diferenças entre as inclinações das retas do xilema com as demais fontes foram significativas, conforme demonstrado pela comparação direta entre as fontes (Tabela A.2). Esses resultados, em conjunto com as linhas de regressão ilustradas na Figura 5.10, indicam que o sinal isotópico das fontes hídricas varia sazonalmente. A aproximação ou distanciamento do sinal do xilema em relação às demais fontes (solo e chuva) reflete mudanças nas estratégias de absorção de água pelas plantas ao longo do ano.

Tabela 5.2 - Modelo linear geral com δ2H (‰) como variável dependente e δ18O (‰) e fontes de água como variáveis independentes. Dados referentes ao período seco, de transição e chuvoso.

	Seco	**Transiçaão**	**Umido**	
Variável		**F test**		**p**
δ18O (‰)	F(1,45) = 158.287	F(1,48) = 237.570	F(1,39) = 40.979	< .001
Fonte de água	F(2,45) = 70.040	F(2,48) = 120.819	F(2,39) = 52.388	< .001
δ18O (‰) * fonte de água	F(2,45) = 47.859	F(2,48) = 81.841	F(2,39) = 28.526	< .001

O teste de Tukey indicou também haver diferenças estatisticamente significativas entre as fontes para os valores de $\delta^{18}O$ (‰) e $\delta^{2}H$ (‰).

A média de $\delta^{18}O$ (Tabela 5.3) confirmou que, em todos os períodos, o sinal isotópico do xilema diferiu significativamente da linha meteórica local (LMWL), com diferenças médias entre -5.9‰ e -8.3‰ ($p < 0.001$). Durante o período seco e chuvoso, o $\delta^{18}O$ do xilema se diferenciou do solo ($p = 0.012$ e $p < 0.001$, respectivamente), sugerindo que as plantas acessam uma fonte de água distinta daquela do solo superficial, especialmente na estação seca. No período de transição, a diferença entre o xilema e o solo foi marginalmente significativa ($p = 0.082$), indicando possível maior compartilhamento da água evaporada do solo nesse momento.

Tabela 5.3 - Resultado das comparações entre pares com correção de Tukey para as médias de $\delta^{18}O$ (‰) de acordo com as fontes de água para os períodos seco, de transição e úmido.

	Seco		Transição		Úmido	
Contraste	**Diferença média**	**p**	**Diferença média**	**p**	**Diferença média**	**p**
LMWL - Xilema	-8.348	< .001	-8.117	< .001	-5.896	< .001
LMWL - Solo	-4.723	< .001	-5.105	0.001	-1.016	0.382
Xilema - Solo	3.625	0.012	3.011	0.082	4.88	< .001

Modelo ANOVA com $\delta^{18}O$ (‰) como variável dependente e fontes de água como variável independente. $F(2,48) = 37.549$; $p < .001$ (Seco). Modelo ANOVA com $\delta^{18}O$ (‰) como variável dependente e fontes de água como variável independente. $F(2,51) = 26.426$; $p < .001$. (Transição). Modelo ANOVA com $\delta^{18}O$ (‰) como variável dependente e fontes de água como variável independente. $F(2,42) = 41.973$; $p < .001$. (Úmido).

Para a média de $\delta^{2}H$, os resultados do teste de Tukey (Tabela 5.4) mostraram que o xilema diferiu significativamente do solo em todos os períodos, com diferenças médias positivas entre 14.2‰ e 19.8‰ ($p < 0.05$). A diferença entre o xilema e a LMWL foi significativa apenas no período de transição ($p = 0.006$), o que sugere que a contribuição direta de água precipitada é mais relevante na estação chuvosa e que o xilema apresenta sinais mais intermediários entre a chuva e o solo evaporado nos outros períodos.

Tabela 5.4 - Resultado das comparações entre pares com correção de Tukey para as médias de $\delta^{2}H$ (‰) de acordo com as fontes de água para os períodos seco, de transição e úmido.

	Seco		Transição		Úmido	
Contraste	**Diferença média**	**p**	**Diferença média**	**p**	**Diferença média**	**p**
LMWL - Xilema	-9.271	0.071	-12.441	0.006	-7.604	0.185
LMWL - Solo	4.977	0.582	3.42	0.744	12.239	0.044
Xilema - Solo	14.248	0.02	15.862	0.004	19.843	0.002

Modelo ANOVA com $\delta^{2}H$ (‰) como variável dependente e as fontes de água como variável independente. $F(2,48) = 4.587$; $p = 0.015$ (Seco). Modelo ANOVA com $\delta^{2}H$ (‰) como variável dependente e fontes de água como variável independente. $F(2,51) = 7.717$; $p = 0.001$ (Transição). Modelo ANOVA com $\delta^{2}H$ (‰) como variável dependente e fontes de água como variável independente. $F(2,42) = 6.988$; $p = 0.002$ (úmido).

5.3.3 $\delta^{2}H$ (‰) e $\delta^{18}O$ (‰) por espécie e profundidade do solo

Para a variação do sinal isotópico entre as espécies e sinal isotópico do solo diferentes profundidades do solo, observou-se uma variabilidade sazonal nos padrões isotópicos dos indivíduos das espécies analisadas. Durante o período

seco, a maioria das espécies apresentou valores de $\delta^{18}O$ mais enriquecidos, em comparação com as profundidades do solo e todas as espécies se distanciaram da faixa isotópica de chuva entre os períodos estudados. (Figura 5.11). Para o $\delta^{2}H$, as espécies mostraram maior enriquecimento em relação ao solo, aproximando-se da faixa isotópica da chuva. Contudo, os indivíduos da espécie *Sapium glandulosum* apresentaram leve enriquecimento durante o período de transição, em relação à faixa da chuva (Figura 5.12).

As amostras da camada de 0–30 cm apresentaram valores de $\delta^{18}O$ e $\delta^{2}H$ mais enriquecidos no período seco, devido à intensa evaporação da camada superficial (Figuras 5.11 e 5.12). Espécies como *Sapium glandulosum*, *Cenostigma microphyllum* e *Manihot carthagenensis* mostraram forte dependência dessa camada, especialmente no período seco, quando a água superficial e evaporada foi mais acessada. A camada de 40–50 cm, embora ainda influenciada pela evaporação superficial, apresentou valores isotópicos mais baixos, sugerindo uma fonte de água mais estável e com menor variação sazonal. Essa camada foi utilizada por *Senegalia piauhiensis*. A camada de ≥60 cm manteve valores isotópicos relativamente estáveis ao longo dos períodos. Espécies como *Commiphora leptophloeos* mostraram dependência dessa camada, sugerindo uma adaptação ao uso de fontes de água mais profundas durante o ano todo.

Figura 5.11 - Gráfico de pontos com barras de erro para os valores de $\delta^{18}O$ (‰) de acordo com a espécie e a profundidade do solo. Os pontos representam as médias e as barras de erro indicam o desvio-padrão. A faixa cinza corresponde ao intervalo de média ± desvio-padrão para LMWL.

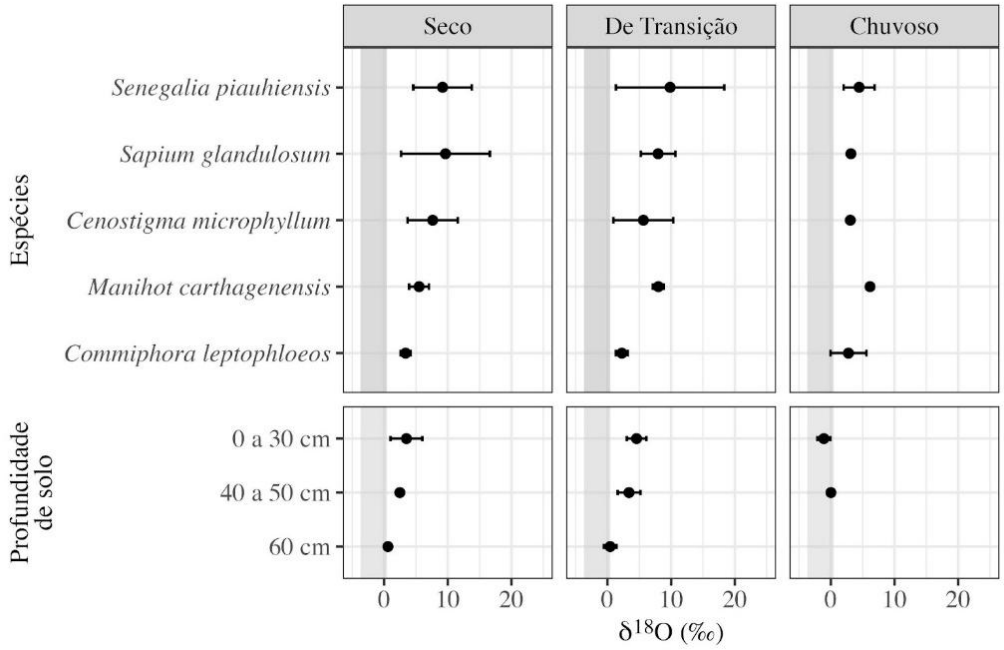
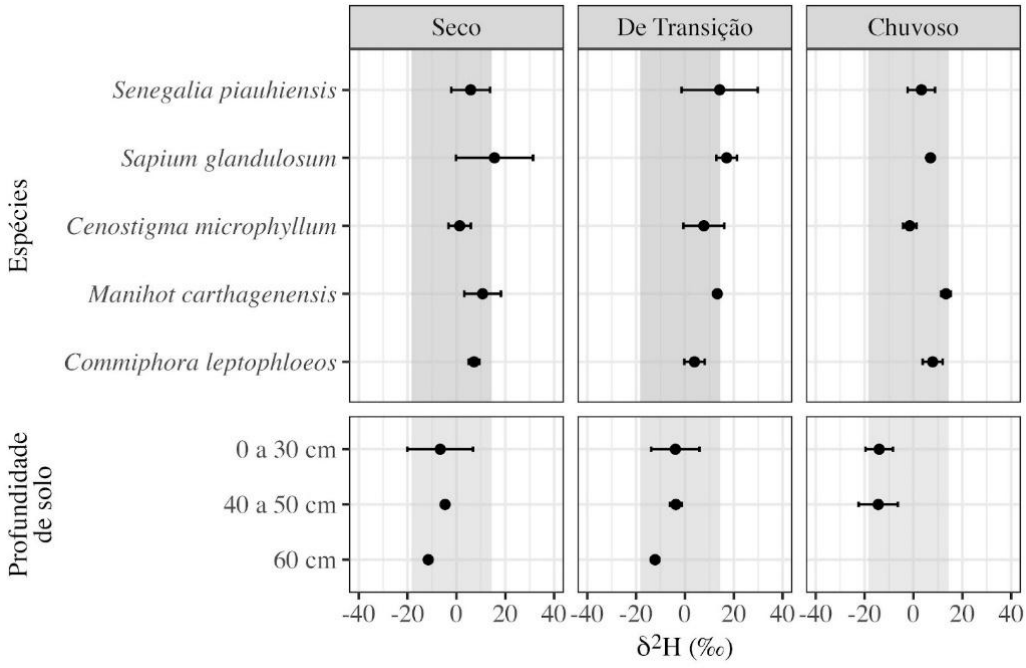


Figura 5.12 - Gráfico de pontos com barras de erro para os valores de $\delta^{2}H$ (‰) de acordo com a espécie e a profundidade do solo. Os pontos representam as médias e as barras de erro indicam o desvio-padrão. A faixa cinza corresponde ao intervalo de média ± desvio-padrão para LMWL.

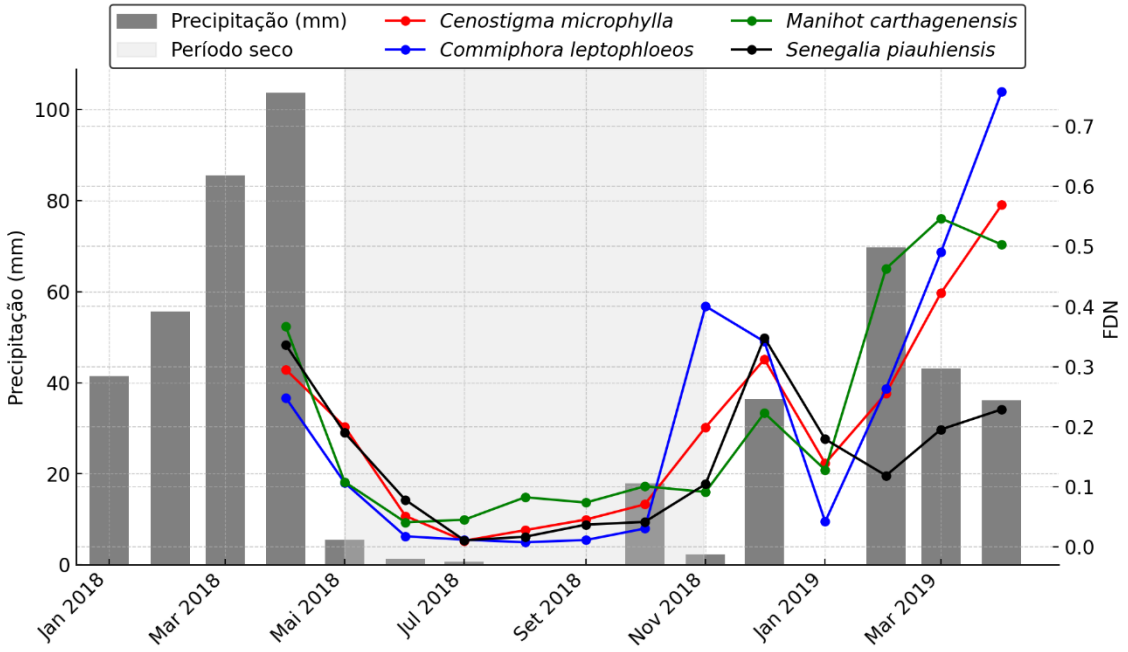


5.4 Fluxo de seiva

A variação do fluxo de seiva (FDN) entre as espécies ao longo do tempo revelou uma forte dependência da sazonalidade da precipitação (Figura 5.13). Durante o período seco, todas as espécies apresentaram uma redução acentuada nos valores de FDN, indicando uma limitação no transporte de água dentro das plantas, em resposta à menor disponibilidade hídrica no solo. Essa redução foi ainda mais acentuada pela senescência foliar, característica das espécies decíduas da Caatinga. No entanto, a magnitude dessa redução e a capacidade de recuperação do FDN variaram entre as espécies.

Os valores de FDN para *Cenostigma microphyllum* foram mais elevados no início do abril, com declínio contínuo até julho de 2018, atingindo valores mínimos entre julho e setembro. A partir de outubro de 2018, observou-se aumento gradual, com novo pico em março de 2019. *Commiphora leptophloeos* apresentou padrão semelhante, com valores iniciais reduzidos, queda até agosto de 2018 e aumento mais acentuado a partir de outubro, alcançando os maiores valores de FDN no final do período, próximos a 0,7 em março de 2019. *Manihot carthagenensis* iniciou o período com valores elevados de FDN em abril de 2018, seguidos de declínio nos meses subsequentes, porém, apresentando uma atividade de fluxo de seiva mínimo entre maio e setembro, com valores baixos e relativamente constantes, com recuperação gradual a partir de outubro e aumento contínuo até março de 2019. *Senegalia piauhiensis* manteve os menores valores de FDN ao longo de todo o período observado, com variações discretas entre os meses, mantendo-se abaixo de 0,3 mesmo nos meses com maior precipitação.

Figura 5.13 – Precipitação mensal (mm) e gráfico de linhas para os valores de FDN, de acordo com a espécie no período de mar/2018 a abril/2019. Sombreado cinza representa o período seco para a região.



5.4.1 Variação de FDN entre as espécies

As análises estatísticas indicaram diferenças significativas ($p < 0,001$) nos valores de FDN entre os períodos seco e chuvoso para todas as espécies investigadas (Figura 5.14). Os valores médios de FDN foram consistentemente superiores no período chuvoso em comparação com o período seco (Figura 5.14). O tamanho do efeito (r) variou de -0,46 a -0,65, indicando uma magnitude de diferenças moderadas a grandes nas variações de fluxo de seiva entre os períodos (Tabela 5.5). *Manihot carthagenensis* apresentou a maior diferença na atividade de fluxo entre os períodos ($r = -0,653$), evidenciando maior sensibilidade às variações sazonais, enquanto *Commiphora leptophloeos* teve a menor diferença ($r = -0,465$), sugerindo uma resposta menos pronunciada à sazonalidade. A análise das médias e quartis revelou que, no período seco, a atividade de fluxo de seiva normalizado (FDN) foi consistentemente menor para todas as espécies, destacando a influência da sazonalidade na atividade fisiológica das plantas da Caatinga.

Figura 5.14 - Densidade de fluxo de seiva normalizado (FDN) por período (seco vs. chuvoso) para as espécies: (a) *Senegalia piauhiensis* (N = 260), (b) *Cenostigma microphyllum* (N = 280), (c) *Commiphora leptophloeos* (N = 163) e (d) *Manihot carthagenensis* (N = 305). As caixas representam os quartis (Q1, Q2 = mediana, Q3), e as barbelas indicam os valores extremos. Diferenças significativas entre os períodos foram avaliadas pelo teste de Mann-Whitney (* p < 0,05). Período seco (maio a outubro), período úmido (novembro a abril).

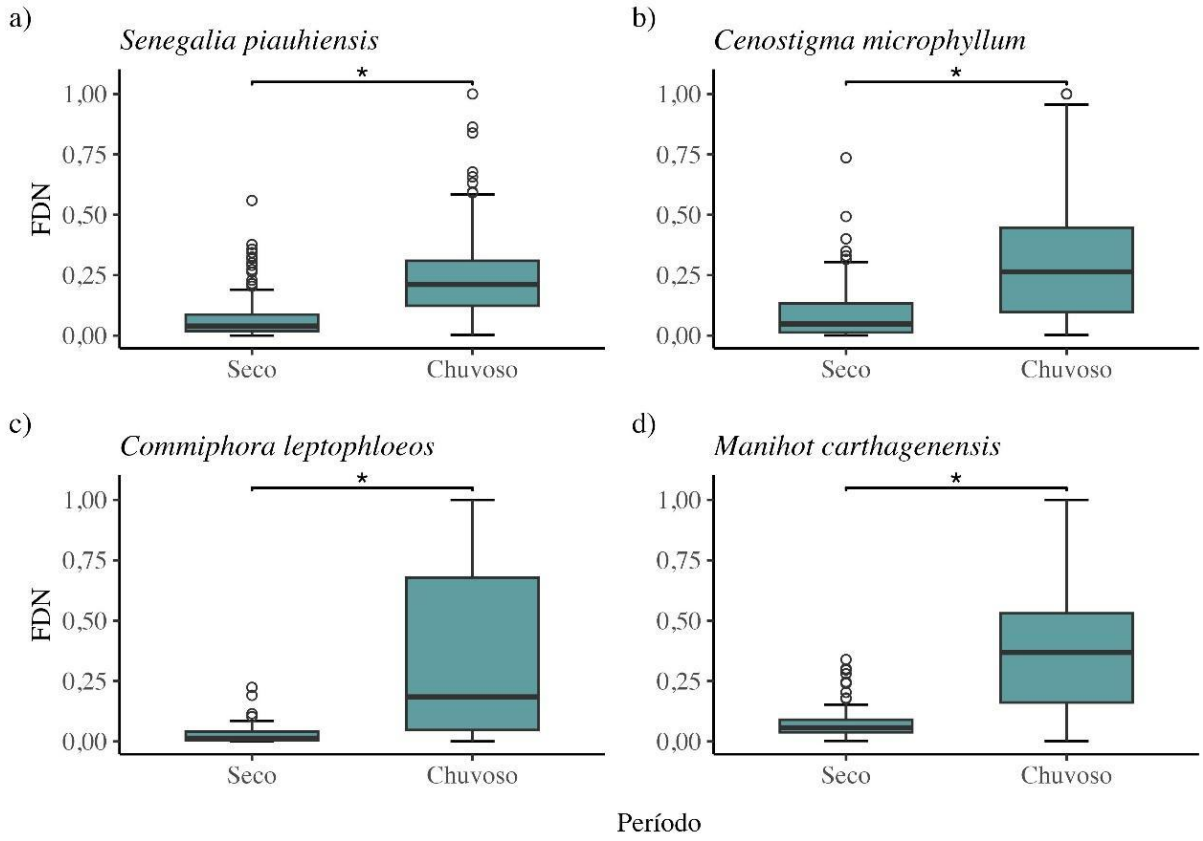


Tabela 5.5 - Comparação dos valores de FDN nos períodos seco e chuvoso para cada espécie.

	Período			
Variável	**Seco (n = 184)**	**Chuvoso (n = 290)**	**p**	**r**
Senegalia piauhiensis			< .001	-0.577
Média (SD)	0.08 (0.10)	0.24 (0.17)		
Mediana (Q1; Q3)	0.04 (0.02; 0.09)	0.21 (0.12; 0.31)		
Cenostigma microphyllum			< .001	-0.543
Média (SD)	0.09 (0.12)	0.30 (0.23)		
Mediana (Q1; Q3)	0.05 (0.01; 0.13)	0.26 (0.10; 0.45)		
Commiphora leptophloeos			< .001	-0.465
Média (SD)	0.04 (0.06)	0.36 (0.35)		
Mediana (Q1; Q3)	0.01 (0.01; 0.04)	0.18 (0.05; 0.68)		
Manihot carthagenensis			< .001	-0.653
Média (SD)	0.07 (0.06)	0.37 (0.25)		
Mediana (Q1; Q3)	0.06 (0.04; 0.09)	0.37 (0.16; 0.53)		

5.4.2 Relações de FDN com as variáveis ambientais (VPD, Armazenamento de água no solo e potencial mátrico do solo)

As relações entre o VPD e o FDN foram ajustadas por modelos lineares para todas as espécies. As espécies *Commiphora leptophloeos* e *Senegalia piauhiensis* apresentaram coeficientes significativos e maior proporção de variação explicada, com 8,4% e 11,6%, respectivamente. *Manihot carthagenensis* também apresentou efeito significativo, mas com menor R^2, indicando que o VPD explica apenas 3,9% da variação no FDN dessa espécie, enquanto *Cenostigma microphyllum* não apresentou relação significativa (Figura 5.15, a - d; Tabela 5.6)

No caso da variável CAS (Armazenamento de água no solo) e o FDN, os modelos não-lineares foram mais adequados para *Cenostigma microphyllum*, *Senegalia piauhiensis* e *Manihot carthagenensis* (Figura 5.15 - e, g, h). Esses modelos indicaram que o FDN aumenta com o aumento da umidade do solo, mas atinge um ponto de estabilização, sugerindo que, após certo limite, o FDN não aumenta proporcionalmente, mesmo com maior disponibilidade de água no solo.

No entanto, o padrão de estabilização observado pode ser influenciado pela análise agregada dos dados dos períodos seco e chuvoso. Para uma compreensão mais precisa das respostas das plantas à umidade do solo e ao VPD, análises mais detalhadas, separando os dados por períodos climáticos, são necessárias.

Diferentemente das outras espécies, *Commiphora leptophloeos* apresentou o modelo linear como o melhor ajuste, com coeficiente significativo, explicando 9,2% da variação do FDN (Figura 5.15, g). Embora o valor de R^2 tenha sido baixo, o modelo sugere que o aumento do FDN dessa espécie pode ser parcialmente explicado pelo conteúdo de água no solo, com um aumento gradual do FDN em relação à umidade, sem um limite aparente dentro do intervalo analisado.

Figura 5.15 - Gráficos de dispersão para a relação entre FDN das diferentes espécies e VPD (Kpa) (a-d) e CAS (mm) (e-h). Os pontos azuis representam dados coletados no período chuvoso. Os pontos vermelhos indicam dados coletados no momento seco. As relações entre FDN e VPD são mais bem descritas por modelos lineares; as relações entre FDN e CAS são mais bem descritas por modelos não-lineares.

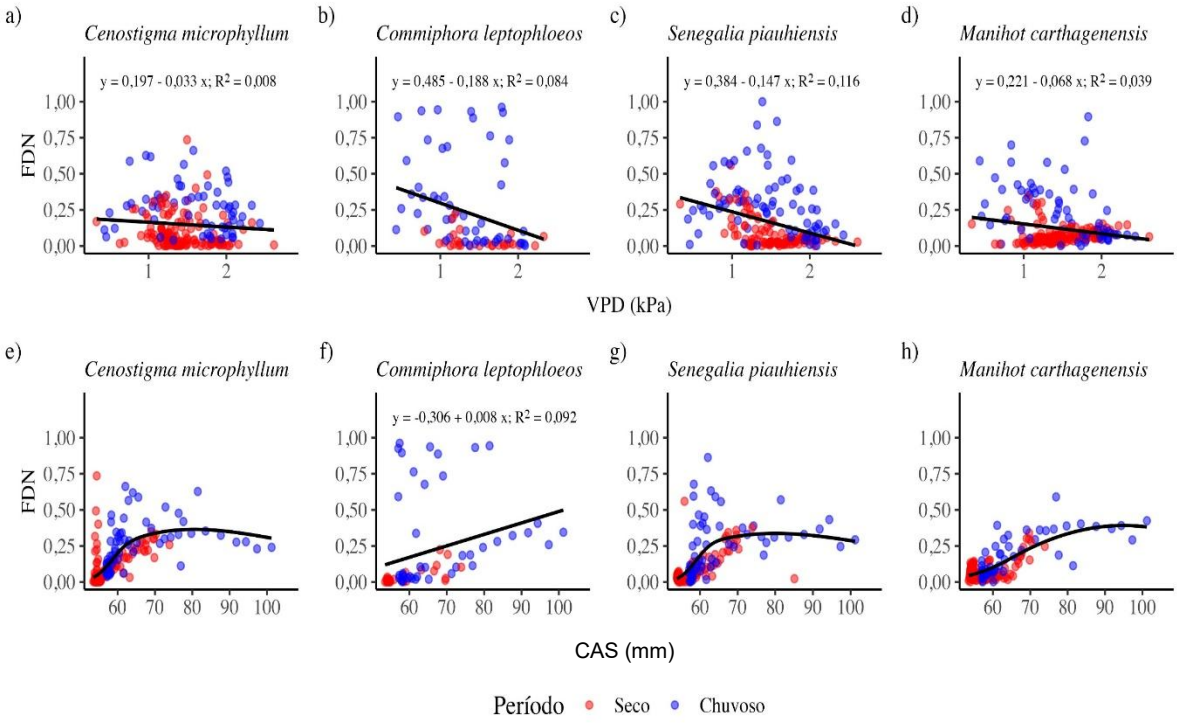


Tabela 5.6 - Resumo dos modelos entre FDN e VPD (modelos lineares) e entre FDN e CAS (modelos lineares e não-lineares), com os respectivos coeficientes e parâmetros ajustados por espécie.

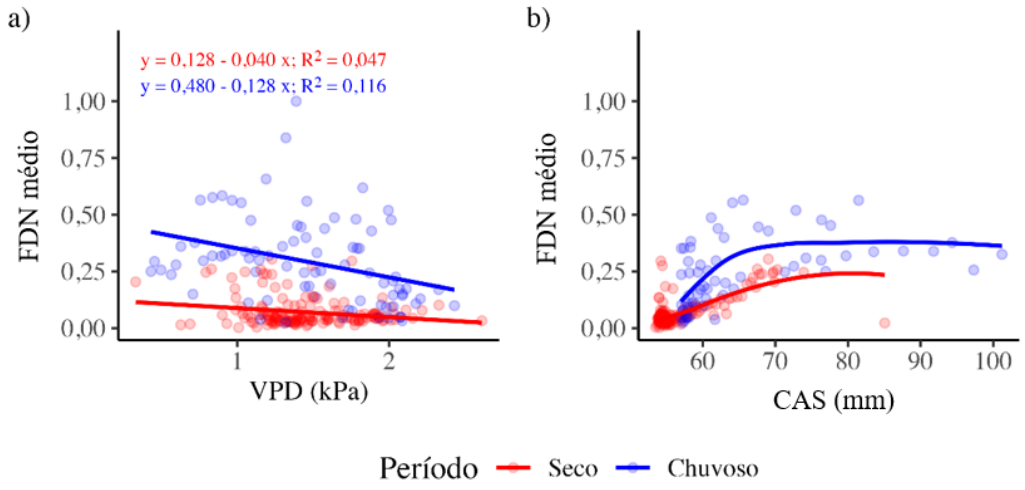
Espécies	β_1 VPD (p)	R^2 VPD	ACS × FDN	Parâmetros
C. microphyllum	–0,033 (0,208)	0,008	Não-linear	a = 0,323; c = 58,786; B = 2,396 (***)
C. leptophloeos	–0,188 (0,010) *	0,084	Linear	0,008 (0,012) ;* R^2 = 0,092
S. piauhiensis	–0,147 (< 0,001)**	0,116	Não-linear	a = 0,301; c = 58,945; B = 2,068 (***)
M. carthagenensis	–0,068 (0,003) *	0,039	Não-linear	a = 0,392; c = 66,959; B = 6,553 (***)

β_1 = coeficiente do modelo linear; a, c, B = parâmetros do modelo não-linear; * p < 0,05 ** p < 0,001, NS = não significativo.

Para a relação entre o VPD (kPa) e a média total de FDN, os resultados dos modelos lineares indicam que o VPD influencia negativamente o fluxo de seiva em ambos os períodos sazonais. Durante o período seco, o VPD mostrou um efeito mais suave sobre o fluxo de seiva, com um coeficiente de regressão (β1) de −0.040 (p = 0.005) e um R^2 baixo (0.047), sugerindo que o VPD influencia o fluxo de seiva, mas que outros fatores, além da demanda atmosférica, podem estar atuando sobre o transporte de água nas plantas. Em contraste, durante o período chuvoso, a influência do VPD foi mais pronunciada, com o modelo apresentando intercepto = 0.480 (p < 0.001), β1 = −0.128 (p = 0.002), e R^2 = 0.116, indicando um maior acoplamento entre a demanda atmosférica e o transporte hídrico nas plantas (Figura 5.16, a).

Em relação ao Conteúdo de água no solo (CAS), a relação com o fluxo de seiva foi ajustada por um modelo não-linear. No período seco, pequenas variações na umidade do solo resultaram em um aumento substancial no fluxo de seiva. A equação ajustada indicou uma resposta mais pronunciada à umidade do solo (a = 0.236, p < 0.001), sugerindo que as plantas, mesmo com a disponibilidade reduzida de água no solo, otimizam o uso da água disponível. Já no período chuvoso, o efeito foi menor, com o modelo indicando uma resposta mais atenuada à umidade do solo (a = 0.370, p < 0.001; c = 59.037, p < 0.001; B = 2.818, p = 0.011), o que reflete uma menor limitação hídrica (Figura 5.16, b).

Figura 5.16 - Gráficos de dispersão para a relação entre FDN médio (média de todas as espécies) e VPD (kPa) (a) e CAS (mm) (b). Os pontos azuis representam dados coletados no período chuvoso. Os pontos vermelhos indicam dados coletados no momento seco.



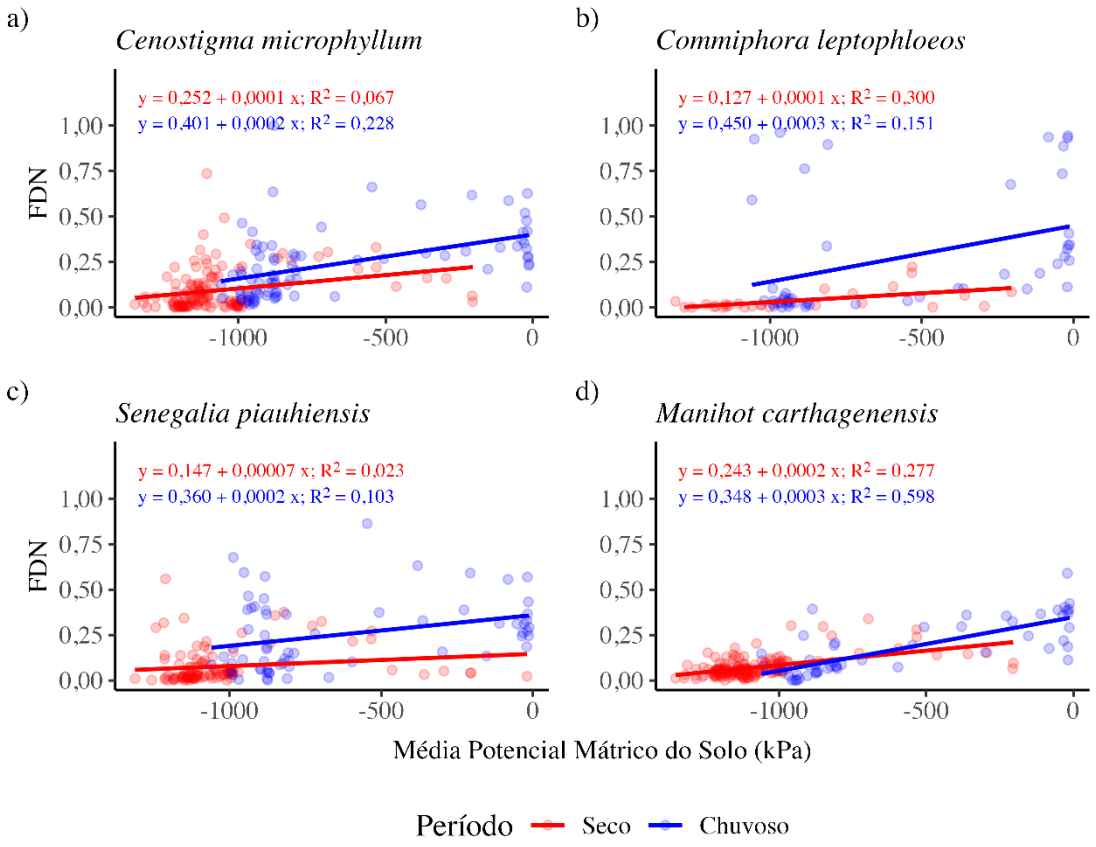
Em relação ao Potencial mátrico do solo e o FDN (Figura 5.17), durante o período seco, apenas duas espécies apresentaram correlação significativa entre o fluxo de seiva (FDN) e o potencial mátrico médio do solo (PM). *Commiphora leptophloeos* mostrou uma relação moderada ($R^2 = 0,300$; $p = 0,003$), explicando cerca de 30% da variação no FDN, enquanto *Manihot carthagenensis* apresentou uma relação semelhante ($R^2 = 0,277$; $p < 0,001$) (Figura 5.17 – b, d) As demais espécies não mostraram relações estatisticamente significativas, sugerindo o uso de mecanismos alternativos de regulação hídrica sob condições de estiagem

No período chuvoso, *Cenostigma microphyllum* e *M. carthagenensis* apresentaram relações significativas com o PM. Para *C. microphyllum*, a correlação foi moderada ($R^2 = 0,228$; $p < 0,001$), enquanto *M. carthagenensis* mostrou a relação mais forte de todo o estudo ($R^2 = 0,598$; $p < 0,001$), indicando elevada sensibilidade à umidade do solo nesse período (Figura 5.17 – a, d).

A análise dos coeficientes angulares (β_1) reforça que *M. carthagenensis* foi a espécie mais dependente da disponibilidade hídrica em ambos os períodos. No período seco, essa espécie apresentou o maior β_1 (0,0002; $p < 0,001$), enquanto as demais tiveram coeficientes ≤ 0,0001 ou relações não significativas. No período chuvoso, tanto *M. carthagenensis* quanto *C. leptophloeos* apresentaram

os maiores coeficientes (β_1 = 0,0003), seguidas por *C. microphyllum* e *Senegalia piauhiensis* (β_1 = 0,0002). Esses resultados indicam que *M. carthagenensis* possui menor tolerância ao estresse hídrico, sendo a mais sensível às variações no PM ao longo das estações.

Figura 5.17 - Gráficos de dispersão para a relação entre o FDN de cada espécie e a média de PM de todas as profundidades. Os pontos azuis representam dados coletados no período chuvoso. Os pontos vermelhos indicam dados coletados no momento seco. Todas essas relações foram mais bem descritas por modelos lineares.



6 DISCUSSÃO

6.1 Isótopos estáveis da água – Fontes de água

Neste estudo, observamos que a água do xilema apresentou sinais isotópicos enriquecidos em $\delta^{18}O$ e $\delta^{2}H$ em comparação com a Linha Meteorológica Local da Água (LMWL) e a água do solo ao longo dos períodos seco, de transição e chuvoso, o que reflete o comportamento esperado em ambientes com forte sazonalidade de precipitação (Figura 5.10).

Durante os períodos chuvosos e de transição, a vegetação mostrou dependência das fontes de água superficiais, como o solo e a chuva, que apresentam valores isotópicos mais leves. No entanto, no período seco, as retas de sinais isotópicos da vegetação não seguiram a mesma tendência observada para as fontes de água do solo e da chuva, sugerindo uma segregação nas fontes utilizadas pelas plantas. Esse desvio pode refletir tanto o uso de fontes hídricas alternativas, quanto efeitos isotópicos associados à evaporação ou redistribuição interna de água nas plantas. Embora os testes estatísticos não tenham detectado diferenças significativas entre as fontes hídricas utilizadas nos diferentes períodos, as distribuições isotópicas no espaço dual (Figura 5.10c) sugerem padrões compatíveis com a separação de nicho hidrológico em alguns indivíduos. Essa evidência qualitativa indica flexibilidade nas estratégias de captação hídrica, possivelmente em resposta à heterogeneidade espacial e temporal da disponibilidade de água ao longo do perfil do solo.

A segregação de nicho hidrológico, conforme discutido por Silvertown et al. (2015), pode ser uma explicação para esse processo. A diferenciação no acesso a diferentes compartimentos hídricos do solo permite que as espécies compartilhem o mesmo ambiente com menor sobreposição de recursos hídricos, minimizando assim a competição por água. Isso pode ocorrer tanto em resposta às condições de seca prolongada quanto à competição intraespecífica. Um estudo realizado por Kukowski et al. (2013), também observaram enriquecimento isotópico no caule durante a seca, especialmente em áreas de solo raso, onde a transição para fontes mais profundas se torna mais pronunciada.

No presente estudo, *Commiphora leptophloeos* e *Senegalia piauhiensis* sugerem estratégias distintas de uso de água. *Commiphora leptophloeos* apresenta sinais isotópicos consistentes com acesso a fontes distintas do solo superficial (0–60 cm), (Figura 5.11). Apesar de sua baixa densidade da madeira, que geralmente está associada a uma maior sensibilidade à seca e maior vulnerabilidade à cavitação (ÁVILA-LOVERA; EZCURRA, 2016; JACOBSEN et al., 2005), *Commiphora leptophloeos* parece se adaptar ao ambiente de forma diferente, utilizando fontes de água distintas e mantendo uma reserva hídrica constante. Isso sugere que, embora a espécie possua características típicas de suculentas de caule, com alta capacidade de armazenamento de água, ela desenvolveu uma estratégia de uso conservativo da água, minimizando a sensibilidade à seca. Já a *Senegalia piauhiensis* com alta densidade da madeira, tem uma estratégia de "evitação de seca", acessando fontes de água intermediárias (40-50 cm) (Figura 5.12), o que permite reduzir os efeitos das flutuações sazonais da água superficial. Ela também apresenta maior resistência estrutural e eficiência no transporte de água, de acordo com o que é descrito na literatura para as espécies que apresentam alta densidade da madeira, o que as tornam também tolerantes a seca (CARRASCO et al., 2015; CHAVE et al., 2009; SERRA - MALUQUER et al., 2022).

Em contrapartida, os resultados do presente estudo, contrastam com os de Wright et al. (2021), que observaram que, em áreas mais úmidas da Caatinga, as espécies dependem mais das fontes superficiais de água, mesmo durante o período seco. Esse contraste pode ser explicado pelas diferenças edáficas e climáticas entre as regiões estudadas. Em Serra Talhada, (sítio estudado por Wright et al. (2021), por exemplo, apresenta maior disponibilidade de água superficial, devido a solos mais profundos e menos pedregosos, que favorecem a exploração de fontes superficiais pelas plantas. Entretanto, em nosso estudo, a região de Petrolina é caracterizada por solos mais rasos e de baixa capacidade de retenção hídrica, o que pode ter forçado as plantas a explorar fontes de água mais profundas e menos acessíveis, uma estratégia essencial para a sobrevivência durante a estação seca (MORO et al., 2016).

Modificações estruturais nas raízes (sistemas radiculares dimórficos) podem ser uma resposta adaptativa que facilita a sobrevivência durante os períodos de seca prolongada (VALLADARES et al., 2007; YANG et al., 2015; BRUM et al., 2018: NIE et al. 2021). Essa modificação potencializa a capacidade das plantas de explorar recursos hídricos de diferentes profundidades, o que contribui para sua resiliência ecológica. Em particular, para o nosso estudo, a espécie *Commiphora leptophloeos* apresenta um padrão distinto ao longo do perfil de profundidade do solo, com um sinal isotópico deplecionado e estável, indicando que a planta acessa predominantemente fontes de água intermediária, localizadas em profundidades que permitem maior estabilidade hídrica (Figura 4.12). No entanto, durante o período úmido, observa-se uma leve transição para o uso de fontes hídricas mais superficiais, possivelmente como uma estratégia para priorizar o acesso a recursos hídricos e nutrientes essenciais para o crescimento vegetativo (WU et al., 2022).

Vale ressaltar que, a profundidade de amostragem do nosso estudo (60 cm) pode não ter sido suficiente para capturar completamente as fontes de água mais profundas utilizadas pelas plantas. Em ambientes com substrato rochoso, as raízes das plantas frequentemente acessam águas em fissuras rochosas ou em camadas mais profundas, essenciais para a sobrevivência das plantas durante a seca. Estudos como os de Albuquerque et al. (2015) e Althoff et al. (2016) demonstram que a profundidade de absorção de água pode ser muito maior do que 60 cm em regiões com solos rasos e pedregosos. Por exemplo, em termos de profundidade de raízes, foi verificado que a espécie da Caatinga *Spondias tuberosa* concentrava suas raízes nos primeiros 100 cm de solo, com variação de 58 a 136 cm de profundidade em algumas plantas (CAVALCANTI; RESENDE, 2006). Além disso, a presença de estruturas de reserva de água, como xilopódios, pode favorecer a sobrevivência das espécies durante a seca, pois permitem o armazenamento de água para períodos de escassez.

Essas adaptações morfológicas, como a profundidade das raízes e a presença de xilopódios e sistemas de raízes dimórficas desempenham um papel crucial na estratégia de segregação de nicho hidrológico, que é fundamental para entender como as espécies competem por água em ambientes secos, como a

Caatinga. A capacidade de explorar diferentes profundidades do solo, seja para acessar água superficial ou mais profunda, pode ser uma resposta adaptativa à competição por recursos hídricos limitados, como sugerido por Zhang et al. (2025), que observaram que algumas espécies de *Quercus acutissima e Pinus massoniana* alteram a profundidade de absorção de água conforme a sazonalidade e a disponibilidade de recursos.

Ademais, a observação de que vários indivíduos de plantas não apresentaram sinais isotópicos compatíveis com as fontes de água amostradas durante a seca sugere que essas plantas podem estar utilizando fontes alternativas, como o orvalho ou fontes subterrâneas não identificadas. Embora o orvalho possa representar uma contribuição pequena, sua detecção isotópica é difícil devido à quantidade limitada de água. Além disso, a absorção de umidade atmosférica por condensação pode ser uma estratégia adicional, especialmente em espécies adaptadas a ambientes secos (ELLER et al., 2013). Esses mecanismos alternativos de captação de água podem representar uma adaptação adicional às condições de escassez, complementando as estratégias principais de exploração das fontes hídricas mais profundas e aumentando a resiliência das plantas da Caatinga durante períodos de seca prolongada.

No período chuvoso e de transição do presente estudo, as fontes de água mais superficiais, como a água do solo e da chuva, são mais utilizadas à medida que a frequência e a intensidade das precipitações aumentam. A maioria dos indivíduos apresentou uma maior uniformidade no uso das fontes hídricas para este período em questão, refletindo a homogeneização dos recursos disponíveis após a recarga do solo pelas chuvas. Essa tendência de uso compartilhado de fontes não é indicativa de competição por escassez, mas sim da abundância relativa de água no ambiente, favorecida pelas condições climáticas mais favoráveis. A relação isotópica entre a água do solo e o xilema das plantas durante o período úmido sugere uma mudança gradual nos mecanismos de captação de água, com uma maior integração das fontes à medida que o solo se recarrega com água isotopicamente mais leve, em contraste com a segregação de nicho observada nos períodos secos.

Por fim, certas limitações metodológicas podem ter influenciado a interpretação dos resultados, além da amostragem do solo, que foi limitada a 60 cm devido à natureza rasa e pedregosa do local de estudo, a amostragem da água do xilema também pode ter influenciado os resultados. No caso, a coleta de apenas um galho por árvore pode não representar totalmente a complexidade da absorção de água pela copa e pelo sistema radicular, considerando que diferentes partes da planta podem depender de reservatórios de água distintos conforme a sazonalidade (SCHULTE; BROOKS, 2003).

Ademais, estudos como o de Volkmann et al. (2021) demonstram que o sinal isotópico do xilema pode variar ao longo do caule, devido a misturas verticais de água dentro do tronco. Embora esse efeito seja mais evidente após eventos de recarga hídrica, ele destaca a importância da padronização na altura e no número de coletas por planta, visto que diferentes segmentos podem refletir sinais de fontes distintas.

A variabilidade potencial nos caminhos de fluxo de água dentro da copa reforça essa limitação, já que distintas regiões da copa podem ser abastecidas por sistemas radiculares que acessam diferentes profundidades do solo. Essas complexidades destacam a necessidade de estudos futuros que integrem amostragens mais profundas do solo e múltiplos pontos de amostragem por árvore para fornecer uma compreensão mais abrangente da dinâmica de absorção de água.

6.2 Fluxo de seiva da vegetação

As espécies analisadas (*Senegalia piaubiensis*, *Cenostigma microphyllum*, *Commiphora leptophloeos e Manihot carthagenensis)* pertencem ao grupo funcional das plantas caducifólias e compartilham algumas características hidráulicas associadas à resposta às variações das condições ambientais sazonais (Figura A. 2, Apêndice A). Todas as espécies exibiram redução acentuada no fluxo de seiva durante a estação seca (PALOSCHI et al., 2021), o que está alinhado com o comportamento típico de caducifólias. No entanto, algumas espécies apresentam respostas ecofisiológicas distintas às variações climáticas sazonais. Essas diferenças sugerem que as espécies desenvolveram

uma diversidade de estratégias adaptativas para regular o fluxo de seiva em resposta às condições climáticas (Figura A. 2, Apêndice A).

Durante o período chuvoso, observou-se uma relação mais evidente entre o FDN médio e o VPD, indicando um certo grau de acoplamento entre a demanda atmosférica e o transporte hídrico nas plantas. A maior disponibilidade de água no solo pode favorecer a eficiência do sistema de condução hídrica, facilitando a transferência de água entre o solo, a vegetação e a atmosfera. No entanto, o VPD apresentou uma capacidade explicativa limitada sobre as variações no FDN (R^2 de 11% no período chuvoso e 4% no período seco), atuando mais como um fator modulador do que como um dos principais determinantes. Ainda assim, para algumas espécies, o VPD parece influenciar a dinâmica hídrica entre os compartimentos do ecossistema, conforme discutido por Salisbury e Ross (1992).

O VPD é um parâmetro relevante para a quantificação dos fluxos de água e carbono, uma vez que a transpiração vegetal está relacionada ao gradiente entre a pressão de saturação e a pressão de vapor no ar (AMARAL et al., 2020). Sob condições de VPD elevado e restrição hídrica no solo, as plantas podem reduzir o uso de água por meio de estratégias como o fechamento estomático ou a abscisão foliar. Em situações extremas, o VPD pode até mesmo dissociar a regulação estomática da disponibilidade de água no solo (GROSSIORD et al., 2018; NOVICK et al., 2019). No entanto, sua influência direta sobre os resultados deste estudo foi secundária.

Estudos anteriores apresentam respostas distintas ao VPD, reforçando que seu efeito depende das características funcionais das plantas. Por exemplo, uma pesquisa com Robinia pseudoacacia *na China detectou variações na transpiração em resposta ao VPD, embora de forma moderada (ZHANG et al., 2014). Já Flo et al. (2021), utilizando dados do SAPFLUXNET, não encontraram uma relação direta entre precipitação anual e condutância da copa, sugerindo que a sensibilidade ao VPD está mais associada a traços funcionais, como vulnerabilidade ao embolismo, condutividade hidráulica e tamanho foliar (FLO et al., 2021). Na Caatinga, Souza et al. (2020) observaram que espécies decíduas

e sempre-verdes exibem diferentes sensibilidades ao VPD, com as decíduas reduzindo mais drasticamente a cobertura foliar em resposta ao aumento do déficit hídrico atmosférico, enquanto as sempre-verdes respondem principalmente à seca do solo. Esses achados reforçam que a influência do VPD varia conforme as adaptações fisiológicas das espécies (BAUMAN et al., 2022), o que pode explicar seu papel menos preponderante em alguns ecossistemas.

De forma complementar para o estudo em questão, no que diz respeito ao conteúdo de água no solo (CAS), foi observado que o FDN médio aumentou rapidamente com pequenos incrementos na disponibilidade hídrica, para o período seco. Essas variações relativamente pequenas na umidade do solo resultaram em um aumento no fluxo de seiva, indicando que as plantas, mesmo com a redução na disponibilidade de água, otimizam o uso da água disponível. Esse comportamento pode ser uma adaptação fisiológica que visa minimizar as perdas de água, permitindo o funcionamento mínimo das plantas para sua sobrevivência. Esse padrão foi particularmente evidente para a espécie *M. carthagenensis*, que se destacou por manter um fluxo mínimo de seiva durante a seca, mesmo na ausência de folhas, o que sugere uma estratégia adaptativa focada em conservar a água (Figura 5.13). No entanto, após atingir um determinado limiar de umidade no período chuvoso, o FDN da maioria das espécies estabilizou-se, sugerindo um mecanismo de regulação das plantas em condições de maior disponibilidade de água (Figura 5.15 – e, g, h).

Nossos resultados estão em consonância com os achados de Paloschi et al. (2021) em outra área da Caatinga, na região de Serra Talhada, onde foi observado que, a partir de um certo nível de armazenamento de água no solo, há uma estabilização no fluxo de seiva. A exceção foi a espécie *C. leptopholoeos*, que apresentou uma relação linear com a umidade. Esse comportamento, porém, pode ser explicado pela baixa frequência de observações dessa espécie entre os períodos de seca e chuva, o que pode ter influenciado a dinâmica de seu fluxo de seiva.

Entre as espécies estudadas, *Manihot carthagenensis* destacou-se por ser a espécie mais afetada pelo potencial mátrico do solo. Esse impacto indica que o

fluxo de seiva dessa espécie responde fortemente à variação ao potencial mátrico, especialmente em solos mais secos, onde a água está retida com maior força pela matriz do solo (GROSSIORD et al., 2017). À medida que o solo seca, as raízes precisam exercer maior “sucção” para extrair água, e plantas com menor capacidade de gerar essa força tendem a ser mais sensíveis ao potencial mátrico negativo (VERHOEF; EGEA, 2014). Para *M. carthagenensis*, essa limitação se reflete na redução significativa do fluxo de seiva a partir de um limiar de -1000 kPa, quando o fluxo atinge limiares próximo a zero durante as estações seca e úmida.

Além disso, essa espécie apresentou o menor período com folhagem ativa (LOS = 120 dias), com um padrão de brotação (SOS e EOS) bem definido e sazonal. Curiosamente, a queda foliar ocorreu ainda em dezembro (diferentemente para as demais espécies) mês tipicamente úmido na região. Esse comportamento pode estar relacionado a fatores bióticos, como herbivoria ou competição por água (SILVA et al., 2020), ou ainda a características funcionais da espécie, como a baixa densidade da madeira, que está associada a uma perda foliar mais precoce (COSME, 2023; LIMA et al., 2012). Esses ajustes indicam uma estratégia caducifólia típica de ambientes secos, que busca reduzir a perda de água por transpiração nos momentos mais críticos. Essas características são compatíveis com uma estratégia conservadora de uso da água**.** De fato, a caducifólia permite conservar a água armazenada em estruturas subterrâneas, como xilopódios presentes nas raízes, encontrados nos gêneros *Manihot*, favorecendo assim as funções vitais mesmo sob estresse hídrico intenso (FORTUNEL et al., 2014; MENDONÇA et al., 2020). Assim, embora *M. carthagenensis* demonstre alta sensibilidade ao déficit hídrico do solo, ela adota um conjunto de estratégias morfológicas e fenológicas que favorecem sua sobrevivência em ambientes secos e sazonais como a Caatinga.

Por outro lado, o fluxo de seiva de *Commiphora leptophloeos* indica que esta espécie adota uma estratégia distinta de uso da água em relação a *Manihot carthagenensis*. Embora ambas apresentem baixa densidade de madeira, *C. leptophloeos* parece depender mais do armazenamento hídrico no caule — uma característica comum entre espécies suculentas da Caatinga, o que pode

aumentar sua vulnerabilidade à cavitação e embolia do xilema durante secas prolongadas ou eventos climáticos extremos, como os associados ao El Niño (BENNETT et al., 2023).

Essa espécie demonstrou alta dependência ao início da estação chuvosa, com sinal de fluxo de seiva já após apenas 2 mm de precipitação em outubro (Figura 4), o que indica uma rápida reativação fisiológica. Essa retomada coincidiu com a redução do déficit de pressão de vapor (VPD), um dos principais fatores de estresse atmosférico. As análises estatísticas mostraram que o VPD explicou 8,4% da variação no fluxo de seiva normalizado (FDN) de *C. leptophloeos*. Já *Manihot carthagenensis*, apesar de também apresentar relação significativa com o VPD, teve um coeficiente de determinação mais baixo (R^2 = 3,9%), indicando menor sensibilidade ao VPD. Esse contraste reforça a hipótese de estratégias fisiológicas diferenciadas entre as espécies, sendo *C. leptophloeos* mais responsiva a variações climáticas de curto prazo.

A média de tempo de permanência foliar (LOS) observada para *C. leptophloeos* reforça essa interpretação: a espécie perde as folhas no auge da seca, como uma decidual típica, como forma de evitar perdas excessivas de água por transpiração em períodos de alta demanda evaporativa (VPD elevado e baixa umidade do solo). Com o retorno das chuvas e a redução do VPD, apresenta rápida brotação e recuperação da atividade fisiológica. Esse comportamento oportunista está de acordo com o observado em outras espécies tropicais adaptadas à seca, como *Olea europaea* e *Laurus nobilis*, que exibem elevada resistência à embolia e rápida retomada funcional após eventos de precipitação (CARDOSO et al., 2020).

Em relação a *Cenostigma microphyllum* e *Senegalia piauhiensis*, foi observado que, apesar de ambas apresentarem alta densidade de madeira, *C. microphyllum* apresentou um desacoplamento em relação ao VPD, ou seja, seu fluxo de seiva (FDN) não variou significativamente em resposta a esse fator ambiental, ao contrário do que foi relatado em outros estudos com o gênero *Cenostigma* (DA SILVA BRITO et al., 2022). Esse comportamento pode estar relacionado à sua alta tolerância ao estresse hídrico, conferida por

características anatômicas como madeira densa, vasos estreitos, elevada densidade de vasos e paredes celulares espessas (DA SILVA BRITO et al., 2022). Durante o período monitorado, *C. microphyllum* apresentou os maiores valores de FDN nos meses de alta precipitação, com declínio acentuado na estação seca e recuperação no início do período chuvoso. Ainda assim, a espécie manteve atividade foliar por aproximadamente 150 dias ao longo do ano (Figura 5.8), o que indica uma estratégia conservadora de uso da água.

Tal padrão é teoricamente compatível com espécies que mantêm suas folhas mesmo sob alta demanda evaporativa, mas com baixa condutância estomática e elevada resistência ao transporte de água — o que resulta em fluxo de seiva reduzido, mas suficiente para preservar a funcionalidade foliar. Assim, o desacoplamento em relação ao VPD não impede a permanência da folhagem, desde que haja mecanismos hidráulicos eficientes que evitem a perda excessiva de água e a ocorrência de embolia. Além disso, *C. microphyllum* demonstra alta capacidade de colonização em áreas degradadas da Caatinga (SFAIR et al., 2018), o que reforça sua resiliência em ambientes com estresse hídrico.

Portanto, os resultados sugerem que o uso da água é espécie-específico, refletindo diferenças funcionais no comportamento ecofisiológico. Isso reforça a importância da diversidade funcional na manutenção dos processos ecológicos da Caatinga (FAGUNDES, 2020). Essas estratégias distintas de regulação do fluxo de seiva frente à sazonalidade revelam o papel funcional específico de cada espécie, contribuindo de maneira diferenciada para a resiliência hídrica e o funcionamento do ecossistema (VALDEZ-HERNÁNDEZ et al., 2010; MEDEIROS t al., 2020).

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho contribui para o aprofundamento do conhecimento sobre as características funcionais das espécies frente à marcante sazonalidade climática do bioma Caatinga. As espécies analisadas demonstraram estratégias distintas para lidar com seu principal fator limitante: a disponibilidade hídrica. Embora o comportamento do fluxo de seiva (FDN) tenha se mostrado relativamente semelhante entre as espécies durante a estação seca, cada uma respondeu de maneira específica às variáveis ambientais. Um contraste evidente foi observado entre *Manihot carthagenensis* e *Commiphora leptophloeos*, ambas caducifólias e com baixa densidade da madeira, mas com padrões ecofisiológicos distintos. Enquanto *C. leptophloeos* adotou uma estratégia mais oportunista, reativando seu fluxo de seiva em resposta a eventos pontuais de precipitação, *M. carthagenensis* mostrou-se mais conservadora, mantendo fluxo mínimo e constante mesmo durante o auge da seca — sendo, inclusive, a única espécie com esse comportamento, apesar de apresentar um menor número de dias com folhas.

Quanto às fontes de água utilizadas, observou-se uma variação sazonal clara. No período seco, as espécies acessaram diferentes compartimentos do solo, provavelmente como estratégia de segregação de nicho hidrológico, reduzindo a competição e favorecendo a coexistência — um padrão já descrito para a vegetação da Caatinga. Já no período chuvoso, houve maior aproveitamento das fontes mais imediatas, como a água da chuva e do solo superficial. No entanto, os padrões isotópicos nem sempre refletiram o comportamento observado no fluxo de seiva, evidenciando que diferentes abordagens metodológicas captam dimensões complementares — mas nem sempre congruentes — do uso da água pelas plantas. Isso revela a dificuldade em classificar rigidamente essas espécies dentro de categorias funcionais padronizadas, pois cada uma parece ‘escrever seu próprio manual de sobrevivência’, no qual pequenas variações ambientais podem determinar quem prospera ou perece em um cenário de mudanças climáticas.

Esses resultados reforçam que, mesmo entre espécies com características estruturais semelhantes, há nuances importantes nas estratégias de resposta ao

estresse hídrico. Tal variabilidade funcional deve ser considerada no planejamento de ações de restauração ecológica, especialmente em ambientes altamente degradados como a Caatinga. Por exemplo, os dados aqui apresentados podem subsidiar decisões estratégicas sobre a composição florística ideal em projetos de restauração, combinando espécies com diferentes tolerâncias e respostas fisiológicas, como *C. microphyllum* (resistente ao VPD) e *C. leptophloeos* (de rápida reativação pós-chuva), para promover maior resiliência ecossistêmica. Além disso, esses resultados podem trazer informações importantes sobre o funcionamento ecológicos dessas espécies para as populações que vivem neste bioma, visto que estas espécies propiciam diferentes benefícios, como por exemplo, uso para lenha, construção, uso como erva medicinal, regeneração de áreas degradas, além de recurso para a fauna local.

Em um contexto de mudanças climáticas, nossas descobertas revelam que a coexistência de estratégias hidráulicas contrastantes entre as espécies (ex.: oportunismo × conservação) pode aumentar a resiliência da Caatinga a secas mais intensas. No entanto, espécies dependentes de chuvas pontuais (*C. leptophloeos*) podem ser especialmente vulneráveis, exigindo ações de conservação que priorizem a diversidade funcional, revelando como múltiplas estratégias de uso da água possibilitam a coexistência das espécies e moldam a estrutura das comunidades vegetais ao longo do tempo.

Por fim, este estudo abre caminho para novas investigações. Questões como: o comportamento de espécies como *C. microphyllum* as tornaria mais aptas a resistir a cenários de maior aridez? ou fontes atmosféricas de água, como neblina ou orvalho, podem contribuir para a dinâmica de transpiração ou manutenção hídrica dessas espécies? Ademais, ampliar o período de monitoramento para além de um ciclo anual permitiria captar respostas de médio prazo frente a eventos extremos (secas severas ou chuvas atípicas).

Em resumo, sabe-se que, longe de ser um sistema simples ou previsível, a Caatinga é um verdadeiro laboratório vivo de soluções hidráulicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, E. R. et al. Root biomass under stem bases and at different distances from trees. **Journal of Arid Environments**, v. 116, p. 82-88, 2015.

ARAGUÁS-ARAGUÁS, L.; FROEHLICH, K.; ROZANSKI, K. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture. **Hydrological Processes**, v. 14, p. 1341-1355, 2000.

ALLISON, G. B. et al. Effect of climate and vegetation on ^{18}O and deuterium profiles in soils. In: CONFERENCE ON ISOTOPES IN HYDROLOGY, 1983, Vienna. **Proceedings...** Vienna: IAEA, 1983. p.105-123.

ALTHOFF, T. D. et al. Climate change impacts on the sustainability of the firewood harvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality, Northeast Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 360, p. 367-375, 2016.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2013.

AMARAL, A. M. et al. Uncertainty in sap flow of Brazilian mahogany determined by the heat ratio method. **Journal of Forest Research**, v. 25, n. 4, p. 531-539, 2020.

ANDERSON-TEIXEIRA, K. J. et al. CTFS-ForestGEO: a worldwide network monitoring forests in an era of global change. **Global Change Biology**, v. 21, n. 2, p. 528-549, 2014.

ANDRADE, E. M. et al. Water as capital and its uses in the Caatinga. In: SILVA, J. M. C.; FIGUEIREDO, M. T. (Ed.). **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**. Berlin: Springer, 2017. p. 281-302.

ANDRADE, E. M. et al. Uncertainties of the rainfall regime in a tropical semi-arid region: the case of the State of Ceará. **Revista Agroambiente**, v. 10, p. 88-95, 2016.

ÁVILA-LOVERA, E.; EZCURRA, E. Stem-succulent trees from the Old and New World tropics. In: GOLDSTEIN, G.; SANTIAGO, L. (Ed.). **Tropical tree physiology**. Cham: Springer, 2016.

BAETA, A. **Stable isotope ecology**. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325387634_Stable_Isotope_Ecology. Acesso em: 20 jul. 2024.

BARBETA, A. et al. The combined effects of a long-term experimental drought and an extreme drought on the use of plant-water sources in a Mediterranean forest. **Global Change Biology**, 2015.

BARBETA, A. et al. Evidence for distinct isotopic compositions of sap and tissue water in tree stems: consequences for plant water source identification. **New Phytologist,** v. 233, p. 1121-1132, 2022. DOI: 10.1111/nph.17857

BARBOSA, D. C. A.; BARBOSA, M. C. A.; LIMA, L. C. M. Fenologia de espécies lenhosas da caatinga. In: LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. (Ed.). **Ecologia e conservação da caatinga**. Recife: Universitária UFPE, 2003. p. 657-693.

BARBOSA, N. S.; BARBOSA, N.; SALLES, L. Q. Métodos de avaliação de isótopos estáveis (δ2H e δ18O) na hidrologia: uma revisão. **Terrae Didatica**, v. 14, p. 157-172, 2018.

BARBOUR, M. M. Stable oxygen isotope composition of plant tissue: a review. **Functional Plant Biology**, v. 34, n. 2, p. 83-94, 2007.

BAUMAN, D. et al. Tropical tree mortality has increased with rising atmospheric water stress. **Nature**, v. 608, n. 7923, p. 528-533, 2022.

BELTRÃO, F. A. S. et al. Caracterização química de diferentes acessos de maniçoba (*Manihot pseudoglaziovii* Pax & Hoffman.) de interesse forrageiro. **Engenharia Ambiental**, v. 12, p. 135-145, 2015.

BENNETT, A. C. et al. Sensitivity of South American tropical forests to an extreme climate anomaly. **Nature Climate Change**, v. 13, p. 967-974, 2023.

BIGELEISEN, J.; MEYER, M. G. Calculation of equilibrium constants for isotopic exchange reactions. **Journal of Chemical Physics**, v. 15, p. 261-267, 1947.

BORMA, L. D. S. et al. Dry season rainfall as a source of transpired water in a seasonal evergreen forest in the western Amazon region inferred by water stable isotopes. **Frontiers in Water**, v. 4, 2022. Disponível em: https://www.frontiersin.org/journals/water/articles/10.3389/frwa.2022.886558/full . Acesso em: 12 abr. 2025.

BRITO, T. R. C. et al. Mudanças no uso da terra e efeito nos componentes do balanço hídrico no Agreste Pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 870-886, 2020.

BRUM, M. et al. Hydrological niche segregation defines forest structure and drought tolerance strategies in a seasonal Amazon forest. **Journal of Ecology**, 2018.

CARDOSO, A. A.; BATZ, T. A.; McADAM, S. A. M. Xylem embolism resistance determines leaf mortality during drought in Persea americana. **Plant Physiology,** v. 182, n. 1, p. 547-554, 2020.

CARRASCO, L. O. et al. Water storage dynamics in the main stem of subtropical tree species differing in wood density, growth rate, and life history traits. **Tree Physiology**, v. 35, n. 4, p. 354-365, 2015.

CARVALHO, P. E. R. **Imburana-de-Espinho - *Commiphora leptophloeos***. Colombo: Embrapa Florestas, 2009. (Comunicado Técnico, 228).

CARVALHO, E. C. D. et al. Xylem anatomical traits determine the variation in wood density and water storage of plants in tropical semiarid climate. **Flora**, v. 298, p. 152185, 2023.

CAVALCANTI, N. B.; RESENDE, G. M. Ocorrência de xilopódio em plantas nativas de Imbuzeiro. **Revista Caatinga**, v. 19, n. 3, p. 287-293, 2006.

CAXITO, F. A.; SILVA, A. V. Isótopos estáveis: fundamentos e técnicas aplicadas à caracterização e proveniência geográfica de produtos alimentícios. **Revista Geonomos**, v. 23, n. 1, p. 10-17, 2015.

CHAVE, J. et al. Towards a worldwide wood economics spectrum. **Ecology Letters**, v. 12, n. 4, p. 351-366, 2009.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1988.

COSME, L. H. M. **Estratégias funcionais em árvores: uma abordagem hidráulica**. 2023. Tese (Doutorado em Biologia Comparada) – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2023.

COSTA, A. B. et al. Caracterização isotópica e estimativa da evaporação usando isótopos estáveis nos reservatórios de França e São José do Jacuípe, Região do Semi-árido Baiano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 2, p. 49-58, 2010.

CURTIS, P. G. et al. Classifying drivers of global forest loss. **Science**, v. 361, n. 6407, p. 1108-1111, 2018.

DAWSON, T. E. Hydraulic lift and water use by plants: implications for performance, water balance, and plant--plant interactions. **Oecologia**, v. 95, p. 565-574, 1993.

DAWSON, T. E.; EHLERINGER, J. R. Isotopic enrichment of water in the 'woody' tissues: Implications for plant water source, water uptake, and other studies which use the stable isotopic composition of cellulose. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 57, p. 3487-3492, 1993.

DAWSON, T. E.; EHLERINGER, J. R. Streamside trees that do not use stream water. **Nature**, v. 350, p. 335-337, 1991.

DUBBERT, M. et al. Oxygen isotope signatures of transpired water vapor: the role of isotopic non-steady-state transpiration under natural conditions. **New Phytologist**, v. 203, n. 4, p. 1242-1252, 2014.

DUCATTI, C. et al. Utilização de isótopos estáveis em ruminantes. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, p. 68-75, 2011.

EHLERINGER, J. R. et al. Differential utilization of summer rains by desert plants. **Oecologia**, v. 88, p. 43-434, 1991.

ELLER, C. B. et al. Foliar uptake of fog water and transport belowground alleviates drought effects in the cloud forest tree species, *Drimys brasiliensis* (Winteraceae). **New Phytologist**, v. 199, n. 1, p. 151-162, 2013.

EPSTEIN, S.; MAYEDA, T. Variations of 18O content of water from natural sources. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 4, p. 213-224, 1953.

FERNANDES, M. F.; CARDOSO, D.; QUEIROZ, L. P. An updated plant checklist of the Brazilian Caatinga seasonally dry forests and woodlands reveals high species richness and endemism. **Journal of Arid Environments**, v. 174, p. 104079, 2020.

FLO, V. et al. Climate and functional traits jointly mediate tree water-use strategies. **New Phytologist**, v. 231, n. 1, p. 617-630, 2021.

FORTUNEL, C. et al. Wood specific gravity and anatomy of branches and roots in 113 Amazonian rainforest tree species across environmental gradients. **New Phytologist**, v. 202, n. 1, p. 79-94, 2014.

FRITZ, C. O.; MORRIS, P. E.; RICHLER, J. J. Effect size estimates: current use, calculations, and interpretation. **Journal of experimental psychology: General**, v. 141, n. 1, p. 2, 2012.

FRITZ, P.; FONTES, J.-CH. **Handbook of environmental isotope geochemistry**. Amsterdam: Elsevier, 1980.

GONFIANTINI, R.; STICHLER, W.; ROZANSKI, K. Standards and intercomparison materials distributed by the International Atomic Energy Agency for stable isotope measurements. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (Ed.). **Reference and intercomparison materials for stable isotopes of light elements**. Vienna: IAEA, 1985. p. 13-29.

GRAIG, H. Isotopic variations in meteoric waters. **Science**, v. 133, p. 1702-1703, 1961.

GRIFFIS, T. J. Tracing the flow of carbon dioxide and water vapor between the biosphere and atmosphere: a review of optical isotope techniques and their application. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 174, p. 85-109, 2013.

GROSSIORD, C. et al. Manipulative experiments demonstrate how long-term soil moisture changes alter controls of plant water use. **Environmental and Experimental Botany**, v. 152, p. 19-27, 2018.

GROSSIORD, C. et al. Precipitation, not air temperature, drives functional responses of trees in semi-arid ecosystems. **Journal of Ecology**, v. 105, p. 163-175, 2017.

HARTZELL, S.; BARTLETT, M. S.; PORPORATO, A. The role of plant water storage and hydraulic strategies in relation to soil moisture availability. **Plant and Soil**, v. 419, p. 503-521, 2017.

HOLANDA, A. C. et al. **Manejo florestal na Caatinga: 40 anos de experimentação**. Brasília: MMA, 2024.

HOLDEN, N. E. et al. IUPAC Periodic Table of the Elements and Isotopes (IPTEI) for the education community (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 90, n. 12, p. 1833-2092, 2018.

INGRAHAM, N. L.; TAYLOR, B. E. Light stable isotope systematic of large-scale hydrologic regimes in California and Nevada. **Water Resources Research**, v. 27, p. 77-90, 1991.

INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES (IPBES). **Global assessment report on biodiversity and ecosystem services**. [S.l.]: IPBES, 2019.

JACOBSEN, A. L. et al. Do xylem fibers affect vessel cavitation resistance? **Plant Physiology**, v. 139, n. 1, p. 546-556, 2005.

KAUR, P.; STOLTZFUS, J.; YELLAPU, V. Descriptive statistics. **International Journal of Academic Medicine**, v. 4, n. 1, p. 60–63, 2018.

KENDALL, C.; CALDWELL, E. A. Fundamentals of isotope geochemistry. In: KENDALL, C.; McDONNELL, J. J. (Ed.). **Isotope tracers in catchment hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 1998. p. 51-86.

KUKOWSKI, K. R. et al. Hydraulic responses to extreme drought conditions in three co-dominant tree species in shallow soil over bedrock. **Oecologia**, v. 171, p. 819-830, 2013.

KUMAR, S. Environmental isotopes in groundwater applications. In: SIDKAR, P. K. (Ed.). **Groundwater development and management**. Cham: Springer, 2018. p. 77-146.

LEAL, I.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. **Ecologia e conservação da Caatinga: uma introdução ao desafio**. Recife: UFPE, 2003.

LENTH, R. V. **EMMEANS: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means**. 2023. Disponível em: https://CRAN.R-oject.org/package=emmeans. Acesso em: 01 maio 2025.

LIMA, A. L. A. **Tipos funcionais fenológicos em espécies lenhosas da Caatinga, Nordeste do Brasil**. 2010. Tese (Doutorado em Botânica) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2010.

LIMA, A. L. A.; RODAL, M. J. N. Phenology and wood density of plants growing in the semi-arid region of northeastern Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 74, p. 1363-1373, 2010.

LIMA, A. L. A. et al. Do the phenology and functional stem attributes of woody species allow for the identification of functional groups in the semiarid region of Brazil? **Trees**, v. 26, p. 1605-1616, 2012.

LIMA, A. Y. V. et al. Grazing exclusion restores soil health in Brazilian drylands under desertification process. **Applied Soil Ecology**, v. 193, p. 105-107, 2024.

LLOYD, J. et al. Ecofisiologia de floresta e vegetação de Savana. In: KELLER, M. et al. (Ed.). **Amazonia and global change**. Washington, DC: AGU, 2009.

MARANGON, G. P. et al. Estrutura e padrão espacial da vegetação em uma área de Caatinga. **Floresta**, v. 43, n. 1, p. 83-92, 2013.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil: past, present and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3/4, p. 1189-1200, 2017.

MARKESTEIJN, L.; POORTER, L. Ecological differentiation in xylem cavitation resistance is associated with stem and leaf structural traits. **Plant, Cell & Environment**, v. 34, p. 137-148, 2011.

MARTINELLI, L. A. et al. **Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

MARTÍNEZ-VILALTA, J. et al. A new look at water transport regulation in plants. **New Phytologist**, v. 204, n. 1, p. 105-115, 2014.

MEDEIROS, D. B. et al. Eating away at ROS to regulate stomatal opening. **Trends in Plant Science**, v. 25, n. 3, p. 220-223, 2020.

MEINZER, F. C. et al. Water transport in trees: current perspectives, new insights and some controversies. **Environmental and Experimental Botany**, v. 45, n. 3, p. 239-262, 2001.

MELO, F. P. L. et al. Using land inequality to inform restoration strategies for the Brazilian dry forest. **Landscape and Urban Planning**, v. 239, p. 104844, 2023.

MENDOZA, J. M. F.; ORLANDINI, P.; MARTINS, M. L. L. Two new species of *Manihot* (Euphorbiaceae) from the Amazon region. **Phytotaxa**, v. 453, n. 3, p. 233-243, 2020.

MILES, L. et al. A global overview of the conservation status of tropical dry forests. **Journal of Biogeography**, v. 33, n. 3, p. 491-505, 2006.

MORO, M. F. et al. A phytogeographical meta-analysis of the semiarid Caatinga domain in Brazil. **The Botanical Review**, v. 82, p. 91-148, 2016.

MORO, M. F. et al. The role of edaphic environment and climate in structuring phylogenetic pattern in seasonally dry tropical plant communities. **PLoS ONE**, v. 10, n. 3, 2015.

NASSAR, N. M. A.; HASHIMOTO, D. Y. C.; FERNANDES, S. D. C. Wild Manihot species: botanical aspects, geographic distribution and economic value. **Genetics and Molecular Research**, v. 7, n. 1, p. 16-28, 2008.

NIE, C. et al. Effects of soil water content on forest ecosystem water use efficiency through changes in transpiration/evapotranspiration ratio. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 308/309, e108605, 2021.

OERTER, E. J. et al. Soil water vapour isotopes identify missing water source for streamside trees. **Ecohydrology**, v. 12, n. 4, e2083, 2019.

OLIVEIRA, D. B. **Fenologia de oito espécies de Manihot (Euphorbiaceae)**. 2018. 31 f. Monografia (Graduação em Biologia) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2018.

PALOSCHI, R. A. et al. Environmental drivers of water use for Caatinga woody plant species: combining remote sensing phenology and sap flow measurements. **Remote Sensing**, v. 13, p. 75, 2021.

PALOSCHI, R. A. **Seasonality of water availability, plant phenology, and plant transpiration in a Brazilian Caatinga environment investigated by in situ and remote sensing data**.Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.

PENNINGTON, R. T.; LAVIN, M.; OLIVEIRA-FILHO, A. Woody plant diversity, evolution, and ecology in the tropics: perspectives from Seasonally Dry Tropical Forests. **Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics**, v. 40, n. 1, p. 437-457, 2009.

PEREIRA, J. J. S. et al. *Commiphora leptophloeos* phytochemical and antimicrobial characterization. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, 2017.

PEREIRA, L. et al. Medidas hidroquímicas e isotópicas em águas subterrâneas que abastecem o município de São Luís – Maranhão. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 18, p. 113-119, 2004.

PETERSON, B. J.; FRY, B. Stable isotopes in ecosystem studies. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 18, p. 293-320, 1987.

PEZZINI, F. F. et al. Changes in tree phenology along natural regeneration in a seasonally dry tropical forest. **Plant Biosystems**, v. 148, n. 5, p. 965-974, 2014.

POORTER, L.; MARKESTEIJN, L. Seedling traits determine drought tolerance of tropical tree species. **Biotropica**, v. 40, n. 3, p. 321-331, 2008.

CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: https://www.R-project.org/.

REICH, P. Root-shoot relations: optimality in acclimation and adaptation or the "Emperor's New Clothes"? In: WAISEL, Y. et al. (Ed.). **Plant roots: the hidden half**. 3.ed. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 205-220.

ROTHFUSS, Y.; JAVAUX, M. Isotopic approaches to quantify root water uptake: a review and comparison of methods. **Biogeosciences**, v. 14, n. 8, p. 2199-2224, 2017.

SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. **Plant physiology**. 4. ed. Belmont: Wadsworth, p. 682, 1992.

SANTOS, J. R.; SILVA, J. M. C.; TABARELLI, M. Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America. In: SILVA, J. M. C.; TABARELLI, M. (Ed.). **Ecologia e conservação da Caatinga**. Recife: Universitária, 2012. p.1-20.

SANTOS, W. R. et al. Eficiência do uso da água para espécies da Caatinga: uma revisão para o período de 2009–2019. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 5, p. 2573–2591, 2021.

SANTOS, C. et al. Isotopic composition of precipitation in a southeastern region of Brazil during the action of the South Atlantic Convergence Zone. **Atmosphere**, v. 12, p. 418, 2021.

SANTOS, C. A. **Variabilidade espacial e temporal da razão isotópica da precipitação na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul**. 2022. 118p. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2022.

SCHULTE, P. J.; BROOKS, J. R. Branch junctions and the flow of water through xylem in Douglas-fir and ponderosa pine stems. **Journal of Experimental Botany**, v. 54, p. 1597-1605, 2003.

SERRA-MALUQUER, X. et al. Wood density and hydraulic traits influence species' growth response to drought across biomes. **Global Change Biology**, v. 28, n. 12, p. 3871-3882, 2022.

SFAIR, J. C. et al. Chronic human disturbance affects plant trait distribution in a seasonally dry tropical forest. **Environmental Research Letters**, v. 13, 2018.

SILVA, J. O. et al. Does leaf flushing in the dry season affect leaf traits and herbivory in a tropical dry forest? **The Science of Nature**, v. 107, n. 51, 2020.

SILVA, V. P. R. et al. Fluxos de radiação e energia em Caatinga preservada e cana-de-açúcar no semiárido. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, 2018.

SILVA, J. P. et al. *Relação da espécie Commiphora leptophloeos com Aedes aegypti: uma revisão*. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, 2022.

SILVERTOWN, J. et al. Hydrological niches in terrestrial plant communities: a review. **Journal of Ecology**, v. 103, p. 93-108, 2015.

SPRENGER, M. et al. Illuminating hydrological processes at the soil-vegetation-atmosphere interface with water stable isotopes. **Reviews of Geophysics**, v. 54, n. 3, p. 674-704, 2016.

SOUZA, B. C. et al. Drought response strategies of deciduous and evergreen woody species in a seasonally dry neotropical forest. **Oecologia**, Berlin, v. 194, p. 221-236, 2020.

SULLIVAN, G. M.; FEINN, R. Using effect size—or why the P value is not enough. **Journal of Graduate Medical Education**, v. 4, n. 3, p. 279–282, 2012.

TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. Áreas e ações prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição de benefícios da biodiversidade do bioma caatinga. In: ARAUJO, E. L. et al. (Org.). **Biodiversidade, conservação e o uso sustentável da flora do Brasil**. Recife: UFPE, 2002. p. 47-52.

TERRA, V.; MORIM, M.P. **Senegalia in Flora e Funga do Brasil.** Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB101003. Acesso em: 14 abr. 2025.

THORBURN, P. J.; EHLERINGER, J. R. Root water uptake of field-growing plants indicated by measurements of natural-abundance deuterium. **Plant and Soil**, v. 177, p. 225-233, 1995.

UREY, H. C. The thermodynamic properties of isotopic substances. **Journal of the Chemical Society**, p. 562-581, 1947.

VALDEZ-HERNÁNDEZ, M. et al. Phenology of five tree species of a tropical dry forest in Yucatan, Mexico: effects of environmental and physiological factors. **Plant and Soil**, v. 329, p. 155-171, 2010.

VALLADARES, F.; GIANOLI, E.; GÓMEZ, J. M. Ecological limits to plant phenotypic plasticity. **New Phytologist**, v. 176, p. 749-763, 2007.

VARGAS, A. I. et al. Testing plant use of mobile vs immobile soil water sources using stable isotope experiments. **New Phytologist**, v. 215, n. 2, p. 582-594, 2017.

VENTURA, D. J. V. S.; SANTOS, B. A. Impacto de caprinos e ovinos sobre a comunidade de plantas regenerantes na Caatinga. **Gaia Scientia**, v. 14, n. 2, p. 127-141, 2020.

VERHOEF, A.; EGEA, G. Modeling plant transpiration under limited soil water: comparison of different plant and soil hydraulic parameterizations and preliminary implications for their use in land surface models. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 191, p. 22-32, 2014.

VOLKMANN, T. H. M. et al. Temporal dynamics of tree xylem water isotopes: in situ monitoring and modeling. **Biogeosciences**, v. 18, p. 4603–4627, 2021. DOI: 10.5194/bg-18-4603-2021.

WEI, Z. et al. Influences of large-scale convection and moisture source on monthly precipitation isotope ratios observed in Thailand, Southeast Asia. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 488, p. 181-192, 2018.

WHITE, J. W. C. et al. The D/H ratios of sap in trees: Implications for water sources and tree ring D/H ratios. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 49, p. 237-246, 1985.

WRIGHT, C. L. et al. Plant functional types broadly describe water use strategies in the Caatinga, a seasonally dry tropical forest in northeast Brazil. **Ecology and Evolution**, v. 11, n. 15, p. 10117-10129, 2021.

WU, Y. et al. Stable isotopic analysis of water utilization characteristics of four xerophytic shrubs in the Hobq Desert, Northern China. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2022.

YAN, C. Y. et al. Application of stable isotope technique in the study of plant water. **Journal of Hubei Forestry Science and Technology**, v. 4, p. 29-33, 1998.

YANG, J. et al. Amazon drought and forest response: largely reduced forest photosynthesis but slightly increased canopy greenness during the extreme drought of 2015/2016. **Global Change Biology**, 2018.

YANG, L. et al. Metrological triangle for measurements of isotope amount ratios of silver, indium, and antimony using multicollector-inductively coupled plasma mass spectrometry: The 21st century Harvard method. **Analytical Chemistry**, v. 82, p. 8978-8982, 2010.

YANG, Q. et al. Temperature and rainfall amount effects on hydrogen and oxygen stable isotope in precipitation. **Quaternary International**, 2019.

ZHANG, JIAN-GUO et al. Interannual variation in stand transpiration estimated by sap flow measurement in a semi-arid black locust plantation, Loess Plateau, China. **Ecohydrology**, 2014.

ZHANG, S. et al. *Quercus acutissima* exhibits more adaptable water uptake patterns in response to seasonal changes compared to *Pinus massoniana*. **Forest Ecosystems**, v. 12, e100255, 2025.

ZHAO, L. J. et al. A preliminary study of water sources of riparian plants in the lower reaches of the Heihe Basin. **Acta Geoscientica Sinica**, v. 29, p. 709-718, 2008.

APÊNDICE A - OUTROS EXEMPLOS DE FIGURAS E TABELAS

Tabela A.1 - Inclinações das retas de acordo com as fontes de água. Dados referentes ao período seco, de transição e úmido.

	Seco		Transição		Úmido	
Fonte de água	**Inclinação [95% CI]**	**p**	**Inclinação [95% CI]**	**p**	**Inclinação [95% CI]**	**p**
LMWL	7.766 [6.548, 8.984]	< .001	7.766 [6.881, 8.651]	< .001	7.766 [6.776, 8.756]	< .001
Xilema	1.196 [0.552, 1.841]	< .001	1.704 [1.352, 2.057]	< .001	2.125 [0.901, 3.350]	0.001
Solo	4.227 [2.627, 5.826]	< .001	2.534 [1.291, 3.777]	< .001	1.892 [-1.482, 5.266]	0.264

Tabela A. 2 - Diferenças entre as inclinações das retas de diferentes fontes de água. Dados referentes ao período seco, de transição e úmido.

	Seco		Transição		Úmido	
Contraste	**Diferenças de inclinação [95% CI]**	**p**	**Diferenças de inclinação [95% CI]**	**p**	**Diferenças de inclinação [95% CI]**	**p**
LMWL - Xilema	6.570 [4.911, 8.228]	< .001	6.062 [4.916, 7.208]	< .001	5.641 [3.745, 7.538]	< .001
LMWL - Solo	3.539 [1.120, 5.959]	0.003	5.232 [3.397, 7.068]	< .001	5.874 [1.639, 10.109]	0.005
Xilema - Solo	-3.030 [-5.105, -0.955]	0.003	-0.829 [-2.383, 0.724]	0.407	0.233 [-4.090, 4.556]	0.991

Figura A.1 - Esquema metodológico integrado para avaliação ecohidrológica na área de estudo (Petrolina, PE).

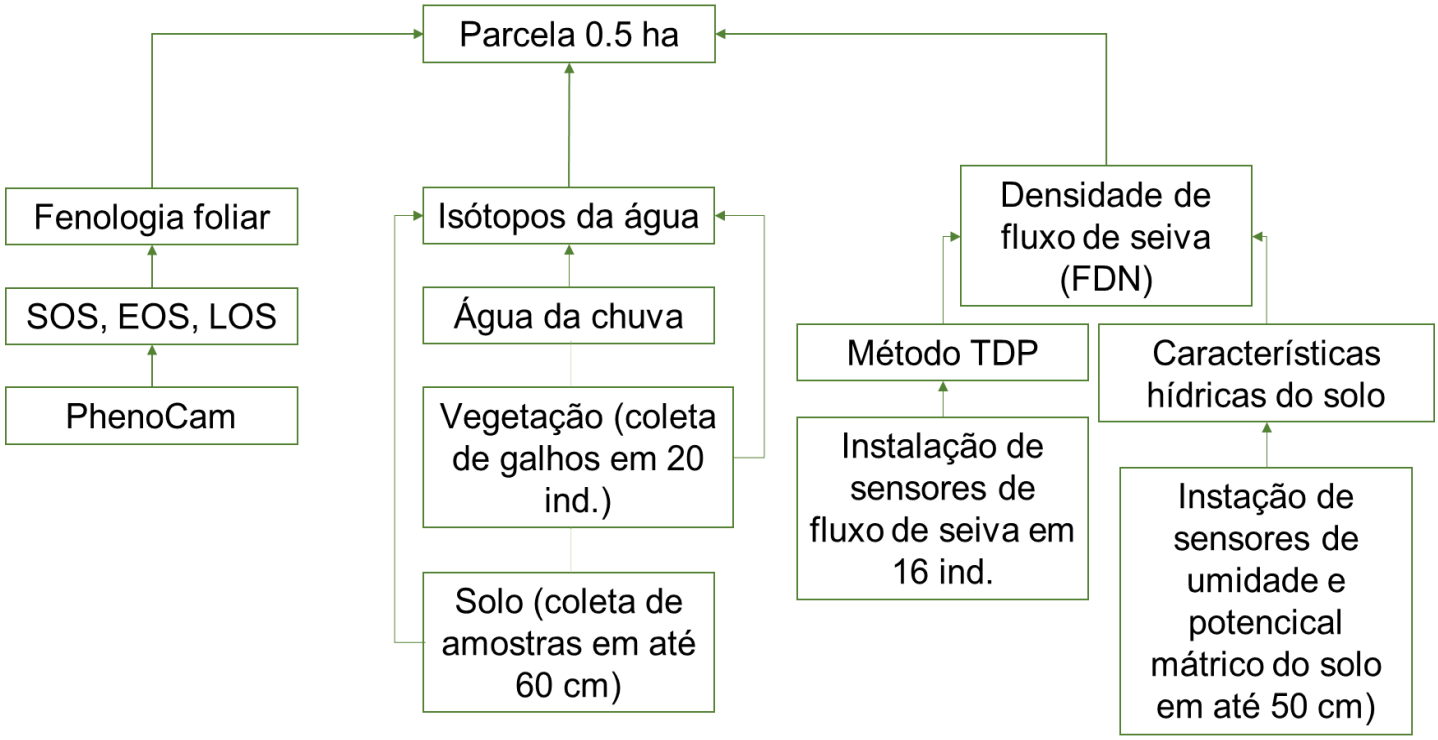


Figura A.2 - Desenho esquemático relacionado *a variação sazonal do FDN, VPD e* eventos fenológicos (SOS/EOS) em espécies caducifólias da Caatinga. a) *S. piauhiensis*, b) *C. leptopholoeos* c) *C. microphyllum* d) *M. carthagenensis.*

