



**ADÉRITO CELESTINO CAU**

**BALANÇO HÍDRICO EM ESPÉCIES FLORESTAIS  
REPRESENTATIVAS DA MATA ATLÂNTICA**

**LAVRAS-MG**

**2024**

**ADÉRITO CELESTINO CAU**

**BALANÇO HÍDRICO EM ESPÉCIES FLORESTAIS REPRESENTATIVAS DA MATA  
ATLÂNTICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Hidrologia, para obtenção do título de Mestre.

Dr. Carlos Rogério de Mello

Orientador

Dr. José Alves Junqueira Júnior

Coorientador

**LAVRAS-MG**

**2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Cau, Adérito Celestino.

Balanço Hídrico em espécies florestais representativas da  
Mata Atlântica / Adérito Celestino Cau. - 2024.

82 p. : il.

Orientador(a): Carlos Rogério de Mello.

Coorientador(a): José Alves Junqueira Júnior.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Biomassa raízes e acima da superfície do solo. 2.  
Armazenamento da água no solo. 3. Evapotranspiração. I. de Mello,  
Carlos Rogério. II. Junqueira Júnior, José Alves. III. Título.

**ADÉRITO CELESTINO CAU**

**BALANÇO HÍDRICO EM ESPÉCIES FLORESTAIS REPRESENTATIVAS DA MATA  
ATLÂNTICA**

**WATER BALANCE IN REPRESENTATIVE FOREST SPECIES OF THE ATLANTIC  
FOREST**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Hidrologia, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 19 de julho de 2024

Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello UFLA

Prof. Dr. André Ferreira Rodrigues UFMG

Prof. Dr. José Alves Junqueira Júnior IFSudeste

Prof. Dr. Gilberto Coelho UFLA



Dr. Carlos Rogério de Mello

Orientador

Dr. José Alves Junqueira Júnior

Coorientador

**LAVRAS-MG**

**2024**

*Aos meus pais, Celestino Lázaro Cau (in memorian) e Lúcia Francisco, que me ensinaram que a escola é o melhor caminho e sempre lutaram para o bem dos seus filhos.*

*À minha esposa Neima e ao meu filho Akin Celestino, por terem suportado minha ausência durante a realização do curso.*

*A todos que, de forma incansável, lutam pela preservação das florestas.*

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida, família, trabalho e pela força que me dá para seguir meu sonho.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, pela oportunidade oferecida a nós, estrangeiros, para realizar o curso.

Ao Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM), pelo afastamento para a realização do curso e pela disponibilização de meios para meu deslocamento ao Brasil.

Ao meu orientador, Professor Carlos Rogério de Mello, pela transmissão dos conhecimentos, apoio, compreensão, melhores orientações e disponibilidade, mesmo quando esteve fora do Brasil. Sinto-me muito grato por ter tido a oportunidade de ser orientado de um grande exemplo de professor e cientista.

Ao meu coorientador, Professor José Junqueira Alves Júnior, pela orientação, incentivo, ensinamentos, paciência e generosidade. Sempre esteve presente para me apoiar em todos momentos.

Aos professores André Rodrigues (UFMG) e Dr. Gilberto Coelho (UFLA/DRH), pelas sugestões, disposição e colaboração na realização deste trabalho.

Ao Renato Antônio da Silva, por todo apoio, conselhos e instruções na matinha, assim como pelas conversas para descontrair a mente. Aos docentes e todo pessoal técnico do Departamento de Recursos Hídricos.

À minha esposa Neima, meu filho Celestino, minha mãe Lúcia e meus irmãos Nércia, Rufino, Neco e Wilma, pelas palavras de força.

Aos meus amigos/colegas Alejandra Vega, Severino Macoo, Alex Nhacololo, Ednilson Barros e aos colegas do DRH, pelo suporte e apoio durante a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq), 402066/2023-5..

Muito obrigado!

## RESUMO

Compreender a capacidade da vegetação da Mata Atlântica na manutenção da dinâmica solo-vegetação-atmosfera é crucial, dado os desafios enfrentados pelos biomas no Brasil devido ao desmatamento e períodos prolongados de seca, especialmente no Sudeste do país. O objetivo deste estudo é avaliar o comportamento do balanço hídrico em espécies florestais da Mata Atlântica, em um remanescente da Floresta Estacional Semidecidual Montana (FESM), localizado em Lavras, Minas Gerais. O monitoramento da umidade do solo foi realizado em 7 pontos no interior do remanescente, e as variáveis hidrológicas como, precipitação externa (GR), interceptação do dossel (C), precipitação efetiva (EP), e além da estimativa de biomassa acima da superfície (AGB), e amostragem da biomassa de raízes (BR) e propriedades hidrológicas do solo ao longo do perfil até 1,80 m. Os resultados revelaram uma concentração vertical da BR, com maior massa nas camadas superficiais do solo (0-60 cm) que diminuiu gradualmente com a profundidade. As raízes mais finas (< 2 mm) predominam nas camadas superficiais, desempenhando papéis essenciais na absorção de água e na ciclagem de nutrientes, enquanto as raízes intermediárias grossas (5 – 50 mm) são abundantes em camadas mais profundas. No balanço hídrico individualizado por árvore, o padrão das chuvas e as características morfológicas das plantas influenciaram os valores de ET, EP e C. A C acompanhou o regime da EP, sendo mais intensa no meio do período seco. Os maiores valores de EP foram observados na *Miconia willdenowii*, enquanto os menores foram na *Xylopia brasiliensis*. Para C, os maiores e menores valores foram observados na *Xylopia brasiliensis*. O armazenamento de água na zona radicular mostrou uma tendência de declínio ao longo do período em todos os pontos monitorados, com flutuações influenciadas pelos eventos de chuva, sendo os maiores valores observados nos locais com a *Miconia willdenowii*. A ET foi mais alta em junho para a maioria das árvores, enquanto abril e julho, e setembro para algumas árvores foram os meses mais críticos. As espécies *Miconia willdenowii* e *Copaifera langsdorffii* apresentaram maiores valores da ET. O AGB foi influenciado pelo diâmetro à altura do peito (DAP), apresentando uma correlação forte com a C do que com a ET. No perfil do solo, a umidade do solo mostrou uma tendência de redução ao longo do período de monitoramento, com as camadas superficiais apresentando menor umidade em comparação com as camadas mais profundas. As variações temporais (CVt) da umidade do solo foram mais evidentes nas profundidades de 20 cm e 140 cm, influenciadas por eventos de chuva e demanda das árvores por água. As variações espaciais (CVs) mostraram uma estabilização com o aumento da profundidade, enquanto a maior variabilidade foi observada na camada superficial (0-20 cm). O Índice de Estabilidade Temporal (TSI) indicou uma maior estabilidade no ponto com *Blefarocalice salicifolius*. Este estudo ressalta a importância crítica da água no solo e da perda de água por evapotranspiração nos ecossistemas florestais tropicais, especialmente em condições de seca, e permitindo identificar a(s) espécie(s) que podem ser utilizadas com maior sucesso na recuperação de áreas degradadas.

**Palavras chaves:** Balanço Hídrico; Armazenamento da água no solo; Precipitação Efetiva; Biomassa de raízes e acima da superfície do solo; Evapotranspiração; Mata Atlântica.

## ABSTRACT

Understanding the capacity of Atlantic Forest vegetation to maintain the soil-vegetation-atmosphere dynamic is crucial, given the challenges faced by Brazilian biomes due to deforestation and prolonged drought periods, especially in the Southeast of the country. The aim of this study is to evaluate the water balance behavior in forest species of the Atlantic Forest, in a remnant of the Montane Semideciduous Seasonal Forest (FESM), located in Lavras, Minas Gerais. Soil moisture monitoring was conducted at 7 points within the remnant, and hydrological variables such as gross precipitation (GR), canopy interception (C), effective precipitation (EP), as well as above-ground biomass (AGB) estimation, root biomass (BR) sampling, and soil hydrological properties along the profile down to 1.80 m were assessed. The results revealed a vertical concentration of BR, with a higher mass in the superficial soil layers (0-60 cm), gradually decreasing with depth. Finer roots (< 2 mm) dominate in the upper layers, playing essential roles in water absorption and nutrient cycling, while intermediate thick roots (5 – 50 mm) are more abundant in deeper layers. In the tree-specific water balance, the rainfall pattern and the morphological characteristics of the plants influenced the values of ET, EP, and C. Canopy interception followed the EP regime, being more intense in the middle of the dry season. The highest EP values were observed in *Miconia willdenowii*, while the lowest were in *Xylopia brasiliensis*. For C, the highest and lowest values were observed in *Xylopia brasiliensis*. Water storage in the root zone showed a declining trend throughout the period at all monitored points, with fluctuations influenced by rainfall events, with the highest values observed at sites with *Miconia willdenowii*. ET was highest in June for most trees, while April, July, and September were the most critical months for some trees. The species *Miconia willdenowii* and *Copaifera langsdorffii* presented the highest ET values. AGB was influenced by the diameter at breast height (DBH), showing a stronger correlation with C than with ET. In the soil profile, soil moisture showed a declining trend throughout the monitoring period, with the superficial layer showing lower moisture compared to deeper layers. Temporal variations (CVt) of soil moisture were more evident at depths of 20 cm and 140 cm, influenced by rainfall events and the water demand of trees. Spatial variations (CVs) stabilized with increasing depth, while the greatest variability was observed in the superficial layer (0-20 cm). The Temporal Stability Index (TSI) indicated greater stability at the point with *Blepharocalyx salicifolius*. This study highlights the critical importance of soil water and evapotranspiration loss in tropical forest ecosystems, especially under drought conditions, allowing the identification of species that can be more successfully used in the recovery of degraded areas.

**Keywords:** Water Balance; Soil Water Storage; Effective Precipitation; Root and Aboveground Biomass; Evapotranspiration; Atlantic Forest

## **INDICADORES DE IMPACTO**

Os resultados desta pesquisa fornecem insights valiosos sobre a importância do bioma da Mata Atlântica, reconhecido como um hotspot de biodiversidade, especialmente em relação às espécies-chaves, à resiliência à seca e à dinâmica da água neste bioma. Os resultados, fornecem também subsídios para o desenvolvimento de políticas públicas e práticas de manejo sustentável, que podem contribuir para a conservação dos ecossistemas florestais da Mata Atlântica, que são ameaçados pelo desmatamento e por fatores naturais, como períodos prolongados de seca, promovendo o uso sustentável da água e da terra. Além disso, o conhecimento gerado pode ser aplicado em projetos de restauração ecológica, em programas de educação ambiental nas escolas e nas comunidades próximas, bem como auxiliar em programas de mitigação dos impactos das mudanças climáticas do bioma. Este estudo está alinhado com 4 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, incluindo: Água Potável e Saneamento, Ação contra a Mudança Global do Clima, Vida Terrestre e Consumo e Produção Responsáveis. Em suma, o estudo visa promover a conscientização e a participação das comunidades na preservação da Mata Atlântica e na mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

## **IMPACT INDICATORS**

The results of this research provide valuable insights into the importance of the Atlantic Forest biome, recognized as a biodiversity hotspot, particularly regarding key species, drought resilience, and water dynamics within this biome. The findings also offer a foundation for the development of public policies and sustainable management practices that can contribute to the conservation of the Atlantic Forest ecosystems, which are threatened by deforestation and natural factors, such as prolonged droughts, thus promoting the sustainable use of water and land. Additionally, the knowledge generated can be applied to ecological restoration projects, environmental education programs in schools and nearby communities, as well as support efforts to mitigate the impacts of climate change on the biome. This study aligns with four United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), including: Clean Water and Sanitation, Climate Action, Life on Land, and Responsible Consumption and Production. In summary, the study aims to foster awareness and community participation in the preservation of the Atlantic Forest and the mitigation of climate change impacts.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação esquemática dos fluxos do balanço hídrico .....	24
Figura 2.2 – Sonda de perfil FDR (Frequency Domain Reflectance) PR2/6 da Delta-T, medindo a umidade volumétrica do solo aos 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm 60 cm e 100 cm de profundidade. ....	28
Figura 2.1 – Localização geográfica da FESM, estação meteorológica e dos pontos de monitoramento de precipitação externa (Gr) e interna (TF), escoamento pelo tronco (SF), umidade do solo, amostragem do solo e biomassa de raízes. ....	43
Figura 2.2 – Pluviômetro instalado nos pontos de monitoramento no interior da FESM. ....	46
Figura 2.3 – Sensor TRIME-PICO da IMKO GmbH combinado com o módulo Bluetooth PICO-BT (a) e o sensor inserido no tubo TECANAT PC (b) .....	48
Figura 2.4 – Amostragem de raízes por monólitos no interior do remanescente. ....	51
Figura 2.5 – Categorias de diâmetro de raízes, sendo raízes finas (<2 mm), intermediárias finas (2 – 5 mm), intermediárias grossas (5 – 50 mm) e as grossas (>50 mm) obtidas em cada camada amostrada.....	53
Figura 3.1 – Massa das raízes (kg/m <sup>3</sup> ) em cada categoria de diâmetro (mm) e massa total das raízes (kg/m <sup>3</sup> ) em cada profundidade do solo em um remanescente da Floresta Estacional Semidecidual Montana. ....	56
Figura 3.2 – Séries temporais mensais dos elementos do balanço hídrico: precipitação efetiva (EP), armazenamento da água no solo (SWS), interceptação do dossel (C), e variação do armazenamento da água no solo ( $\Delta W$ ) em cada espécie da FESM, durante o período de abril a setembro de 2023.....	58
Figura 3.3 – Elementos do balanço hídrico (EP, SWS e C) em cada ponto com a espécie representante durante o período de estudo (período seco) na FESM. ....	61
Figura 3.4 – Comportamento da ET em cada espécie avaliada no interior da FESM.....	64
Figura 3.5 – Matriz de correlação entre a biomassa radicular (BR) e umidade do solo em cada ponto de monitoramento.....	68
Figura 3.6 – Relação da distribuição da biomassa de raízes e umidade no perfil do solo, considerando a proximidade entre os pontos de amostragem de raízes (a, b, c) e de monitoramento de umidade do solo (P6, P24, P30, P42, P45, P60 e P62).....	69

Figura 3.7 – Variação da umidade no perfil do solo durante o período de estudo (período seco) no remanescente da FESM. ....	71
Figura 3.8 – Distribuição de indicadores de estabilidade temporal e espacial de $\theta$ FESM para o período de monitoramento.....	72
Figura 3.9 – Análise de redundância para $\theta$ em função das BR, Dp, PT e Ds no perfil do solo (a) e análise de correlação entre as variáveis (b).....	74
Figura 3.10 – Diferença relativa média e Índice de estabilidade Temporal (TSI) para o SWS considerando os pontos de monitoramento (abril a setembro de 2023) com espécies representativas da Mata Atlântica. ....	75

### **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Espécies florestais representativas que serviram para o balanço hídrico no remanescente da FESM. ....	45
Tabela 3.1 – Valores de AGB e cumulativos da C e ET por espécie. ....	66
Tabela 3.2 – Atributos físico-hídricos do solo do remanescente da FESM em estudo até 180 cm de profundidade. ....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS

AC	ascensão capilar
AGB	biomassa acima da superfície
CV	coeficiente de variação
DAP	diâmetro a altura do peito
DEF	deficiência hídrico
DR	diferença relativa
EXC	excedente hídrico
FESM	Floresta Estacional Semidecidual Montana
SWS	água armazenada no solo
TSI	índice de estabilidade temporal

## LISTA DE SIGLAS

INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
UFLA	Universidade Federal de Lavras

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta W$	variação de armazenamento de água integrada à profundidade das raízes
A	área
C	interceptação pelo dossel
Cwa	classificação climática de Köppen para Lavras-MG
DLi	drenagem lateral de entrada
DLo	drenagem lateral de saída

Dp	densidade das partículas
Dr/DP	resíduo do balanço hídrico
Ds	densidade do solo
EP	precipitação efetiva
ET	evapotranspiração
ETc	evapotranspiração da cultura
ETo	evapotranspiração de referência
ETp	evapotranspiração potencial
Etr	escoamento pelo tronco
ETr	evapotranspiração real
GR	precipitação bruta (externa)
h	Altura
ha	Hectare
Kc	coeficiente da cultura
Ksat	condutividade hidráulica saturada
O	orvalho
P	precipitação
PT	porosidade total
Ri	escoamento superficial
Ro	escoamento superficial
SF	escoamento pelo tronco
$\theta$	umidade do solo
TF	precipitação interna
V	volume

## SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE.....</b>	<b>16</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Mata Atlântica .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Hidrologia florestal .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>Balanco hídrico.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4</b>	<b>Umidade do solo .....</b>	<b>26</b>
<b>2.5</b>	<b>Biomassa florestal subterrânea .....</b>	<b>29</b>
<b>2.6</b>	<b>Biomassa florestal acima da superfície .....</b>	<b>30</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>32</b>
	<b>SEGUNDA PARTE.....</b>	<b>40</b>
	<b>BALANÇO HÍDRICO EM ESPÉCIES FLORESTAIS REPRESENTATIVAS DA MATA ATLÂNTICA .....</b>	<b>40</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>41</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>43</b>
<b>2.1</b>	<b>Localização e aspectos gerais da área de estudo .....</b>	<b>43</b>
<b>2.2</b>	<b>Precipitação bruta.....</b>	<b>45</b>
<b>2.3</b>	<b>Monitoramento da precipitação interna e escoamento pelo tronco .....</b>	<b>46</b>
<b>2.4</b>	<b>Precipitação efetiva e precipitação interceptada.....</b>	<b>47</b>
<b>2.5</b>	<b>Monitoramento da umidade do solo e determinação do armazenamento de água no solo.....</b>	<b>47</b>
<b>2.6</b>	<b>Estabilidade temporal da umidade do solo.....</b>	<b>49</b>
<b>2.7</b>	<b>Determinação do Balanco hídrico .....</b>	<b>50</b>
<b>2.8</b>	<b>Quantificação da biomassa radicular no perfil do solo .....</b>	<b>51</b>
<b>2.9</b>	<b>Estimativa da biomassa acima da superfície .....</b>	<b>53</b>

2.10	Caracterização dos atributos físicos do solo.....	53
2.11	Análise de dados.....	54
3	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>56</b>
3.1	Distribuição da biomassa radicular das espécies da FESM.....	56
3.2	Balanco hídrico individualizado por árvore.....	58
3.3	Relação entre o estoque de biomassa acima do solo, evapotranspiração e interceptação da chuva pelo dossel.....	66
3.4	Relação entre a umidade e distribuição da biomassa radicular no perfil do solo e características hidrológicas do solo em cada ponto de monitoramento .....	67
3.5	Comportamento espacial e temporal da umidade no perfil do solo na FESM.	71
3.6	Estabilidade temporal da umidade nos pontos com espécies avaliadas na FESM.....	74
4	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>76</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>77</b>

## **PRIMEIRA PARTE**

### **1 INTRODUÇÃO GERAL**

A preservação das florestas é crucial não apenas para a conservação da biodiversidade (Santos *et al.*, 2019), mas também para melhoria da prestação de serviços ecossistêmicos. É bem conhecido que, em nível global, as florestas enfrentam consideráveis perturbações, tanto antropogênicas quanto naturais, manifestando-se diversos padrões, severidade e persistência ao longo do tempo e espaço, impactando os processos dinâmicos florestais e hidrológicos (Hou e Wei, *et al.*, 2024). Um fenômeno paralelo a essas perturbações é a seca, que juntos, têm afetado grande parte das florestas tropicais do mundo (Savelli *et al.*, 2022), com impactos significativos na vegetação, fluxos hídricos e os comportamentos das espécies (Hou *et al.*, 2024).

A seca ocorre em diferentes graus de magnitude e duração, impactando os seres humanos, ecossistemas, produção agrícola e os cursos hídricos (Deng *et al.*, 2024). As projeções futuras indicam um aumento na frequência, intensidade e duração em várias regiões do mundo (Savelli *et al.*, 2022), constituindo uma ameaça crescente à resiliência dos ecossistemas.

Cenários atuais mostram que, em regiões de bacias hidrográficas, as secas hidrológicas mais severas, no contexto de alterações climáticas, têm gerado preocupações devido à sua contribuição para a redução das vazões mínimas (Hou *et al.*, 2024) e baixa disponibilidade de umidade no solo (Deng *et al.*, 2024). Durante o período da seca, as árvores sofrem estresse hídrico, o que afeta as funções fisiológicas (Colliander *et al.*, 2020), embora algumas espécies tropicais ativem mecanismos fisiológicos para suportar condições de secas (Rodrigues *et al.*, 2021b). A intensificação contínua das secas pode desencadear a mortalidade das árvores e favorecer o deslocamento de espécies mais adaptadas às condições áridas.

Segundo Souza *et al.* (2016) a mortalidade florestal, intensificada pela seca severa seguida de anos subsequentes mais úmidos, pode resultar em fortes eventos de recargas ou escoamentos anormais, além de inundações repentinas. O mesmo autor, afirma que as diferentes dimensões da sazonalidade da precipitação nas regiões tropicais estão mudando com o aumento da variabilidade interanual, o que tem impactado na vegetação local e nos processos hidrológicos. Com a degradação florestal, as emissões de carbono podem aumentar na atmosfera, afetando o clima global e provocando mudanças ambientais (Lu *et al.*, 2016).

Portanto, pensar em estratégias de conservação torna-se essencial para a Mata Atlântica, considerada um *hotspot* estratégico da biodiversidade e com uma grande diversidade de espécies endêmicas (De Lima *et al.* 2020a; Mantovani *et al.*, 2022; Terra *et al.*, 2018). Uma prática comum na conservação da biodiversidade é focar em espécies com alto valor de conservação, como aquelas ameaçadas de extinção ou endêmicas, exclusivas de determinada região ou habitat (De Lima *et al.*, 2020). No entanto, é importante considerar que as características morfológicas e o tempo de vida das espécies vegetais variam amplamente, o que cria grandes desafios na definição de estratégias e opções para a escolha das espécies adequadas à preservação e restauração de áreas florestais (Fantozzi *et al.*, 2024).

Estudar as interações entre a parte vegetativa das plantas e variáveis hidrológicas pode ajudar a compreender a dinâmica da água nas florestas, uma vez que os processos fisiológicos que as plantas realizam que consistem no acesso, transporte, transpiração, através das raízes, caule e folhas, respectivamente, têm um forte impacto no equilíbrio hídrico em ecossistemas florestais (Chen *et al.* 2010), sobretudo no período seco.

Nesse sentido, objetiva-se nesta pesquisa, estudar o balanço hídrico de forma individualizada em espécies florestais representativas da Mata Atlântica, no período seco, focando-se na distribuição da biomassa de raízes no solo e da biomassa acima da superfície do solo.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Mata Atlântica

A Mata Atlântica brasileira é um bioma tropical, com clima quente e úmido, localizada na parte litoral do Brasil, estendendo-se no sentido norte sul com uma floresta tropical perene e com uma extensão para o interior na parte sul, abrangendo Paraguai e Uruguai, onde as florestas são sazonalmente secas (Mantovani *et al.*, 2022; Terra *et al.*, 2018). É o Lar de cerca de 70% da população brasileira (Guerrini *et al.*, 2023) e cerca de 35% da população sul-americana (De Lima *et al.*, 2020).

Na sua composição, a Mata atlântica apresenta formações florestais nativas tais como: floresta Ombrófila Densa; Ombrófila Mista e Ombrófila Aberta; Estacional Decidual e Estacional Semidecidual, e ecossistemas como manguezais e restingas, campos de altitude, brejos interioranos e enclaves florestais (De Lima *et al.*, 2024). Apresenta uma vegetação complexa sem uma distribuição uniforme ao longo do território, isto é, com maior concentração na região central, e que segue todos os níveis de fragmentação da Mata Atlântica (De Lima *et al.*, 2024). Os seus remanescentes dispõem de uma variedade de espécies endêmicas e não endêmicas, características essas que fazem deste bioma como um *hotspot* da biodiversidade (Scolforo *et al.*, 2017; Rodrigues *et al.*, 2021). Cerca de 65% de todas espécies e 82% das espécies endêmicas deste bioma são classificadas como ameaçadas fatores antropogênicos e naturais (De Lima *et al.*, 2024)

A Mata Atlântica é a floresta mais fragmentada do mundo (De Lima *et al.*, 2020), com cerca de 80% dos fragmentos com uma área de até 50 hectares (Dias *et al.*, 2023). É alvo da devastação causada pelo desmatamento desde o período colonial no Brasil, tornando-se uma das florestas mais ameaçadas do mundo, devido aos efeitos negativos decorrentes de mudanças históricas relacionadas ao uso da terra, sucessivos ciclos econômicos e a contínua expansão da população nas zonas urbanas e rurais (Dias *et al.*, 2023; Junqueira Júnior *et al.*, 2019; Ranzini *et al.*, 2022 e Scolforo *et al.*, 2017).

Considerando apenas o Brasil, a área original da Mata Atlântica era de aproximadamente 1.315.460 Km<sup>2</sup> (equivalente a 15% da área territorial do Brasil) (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA, 2018). Atualmente, 26 – 28% da sua cobertura contínua e a maioria em estado de regeneração (Guerrini *et al.*, 2023) e desses, apenas 8,5% é de remanescentes florestais acima de 100 hectares e 12,4% de remanescente florestal e áreas naturais acima de 3 hectares.

Apesar da sua fragmentação e degradação, o bioma Mata Atlântica fornece inúmeras funções e serviços ecossistêmicos importantes, incluindo a regulação do ciclo hidrológico, a mitigação de desastres naturais, absorção e armazenamento do carbono e ciclagem de nutrientes (Mello *et al.*, 2019, Rodrigues *et al.* 2021b e Mantovani *et al.*, 2022). Por tanto, a preservação dos remanescentes da Mata Atlântica é de extrema importância, sobretudo de suas espécies ameaçadas. Mesmo com o menor índice de desmatamento atualmente, os efeitos da perda do habitat nos tempos passados (anos 50 a 70), podem ser sentidos ainda nas próximas décadas (De Lima *et al.*, 2024).

No estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil, o bioma da Mata Atlântica é composta por dois tipos de florestas, florestas ombrófilas e florestas estacionais semidecíduas, cuja última abrange a maior parte deste bioma (Scolforo *et al.*, 2017; Mantovani *et al.*, 2022). A floresta estacional semidecídua estende-se mais para o interior (zona transicional para cerrado) e é composta por 50% espécies que perdem folhas na estação seca como mecanismo de resistir a seca (Mantovani *et al.*, 2022). Nesta região, a floresta estacional semidecídua tem experimentado períodos de secas prolongadas (Mantovani *et al.*, 2022) e perturbações devido a exploração de madeira e prática de agricultura (Guerrini *et al.*, 2023), o que tem motivado a realização de pesquisas científicas nos remanescentes para entender os seus impactos.

Um dos exemplos é o fragmento da Floresta Estacional Semidecidual de Montana (FESM), localizada em Lavras, no interior de UFLA, onde desde 1994 é realizado o monitoramento da vegetação, focando-se nas alterações no crescimento, distribuição, mortalidades das espécies vegetais assim como outras variáveis do manejo florestal. É realizado também o monitoramento dos elementos do balanço hídrico desde o ano 2012, e várias pesquisas hidrológicas foram realizadas a partir desse período, tais como:

- i. Junqueira Júnior *et al.* (2017) estudaram a estabilidade temporal do teor de água do solo entre junho de 2013 e março de 2015, estudando as relações entre a precipitação interna e umidade do solo a 1, 0 m de profundidade, assim como a relação entre os indicadores da paisagem e sua estabilidade no tempo;
- ii. Terra *et al.* (2018) estudaram o comportamento espaço-temporal do escoamento pelo tronco, entre abril de 2016 e março de 2017, amostrando o efeito das características da floresta neste elemento do balanço hídrico florestal, ademais sua correlação com a umidade do solo;
- iii. Junqueira Júnior *et al.* (2019) modelaram o processo de interceptação florestal no fragmento de Mata Atlântica para o período de setembro de 2012 a março de 2015, analisando o comportamento da interceptação sobre condições de seca (nos anos

- hidrológicos de 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015 e sua relação com as características da floresta;
- iv. Rodrigues *et al.* (2020) estudaram o comportamento espacial do conteúdo de umidade no solo até 1,0 m de profundidade e a precipitação efetiva nos anos 2014 e 2015, trabalhando a relação com a topografia e características semidecíduas da floresta;
  - v. De Oliveira *et al.* (2021), modelam a dinâmica espaço-temporal da umidade do solo por meio de quatro algoritmos de aprendizado de máquina.
  - vi. Rodrigues *et al.* (2021) avaliaram a interceptação do dossel, a precipitação interna e o fluxo pelo tronco no período de seca prolongada entre 2013 e 2019 usando os modelos Gash e Liu e as alterações no balanço hídrico e como a floresta responde às secas, aplicando o Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração para identificar as secas de 1961 a 2019 e sua severidade tanto no ano hidrológico quanto na escala de verão.
  - vii. Mantovani *et al.* (2021) estudaram os padrões espaciais e temporais nas entradas de carbono e nitrogênio na Mata Atlântica, depois de interagir com o dossel da floresta, entre maio de 2018 a abril de 2018.
  - viii. Mantovani *et al.* (2022) estudaram os fatores bióticos e abióticos que influenciam a taxa de enriquecimento de carbono do escoamento pelo tronco, avaliando os efeitos das características estruturais das árvores, sazonalidade e intensidade máxima de precipitação sobre as taxas de enriquecimento de carbono total e o escoamento pelo tronco;
  - ix. Rodrigues *et al.* (2022) estudaram a estabilidade temporal da variabilidade espacial da precipitação interna, usando um conjunto de 6 anos hidrológicos (2013 a 2019).
  - x. Guaque-Mellado *et al.* (2022) estudaram a evapotranspiração em condições de seca na Mata Atlântica sazonalmente seca, usando um conjunto de dados de 2013 a 2019, para apresentar as tendências diárias de evapotranspiração e;
  - xi. Mantovani *et al.* (2024) que estudaram estoques de carbono no solo incrivelmente altos e sua variabilidade espacial em uma Mata Atlântica sazonalmente seca do Brasil, determinando os estoques de carbono do solo nas profundidades de 0-5cm, 5-10cm, 10-20cm, 20-30cm, 30-40cm, 40-60cm e 60-100cm em um fragmento florestal localizado no *hotspot* da Mata Atlântica.

Estes estudos têm uma grande relevância por fornecerem subsídios para estratégias de conservação e manejo sustentável dos ecossistemas ameaçados, como é o caso da Mata Atlântica.

## 2.2 Hidrologia florestal

A cobertura florestal possui uma estreita relação com o ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica, influenciando no movimento da água em vários compartimentos do sistema, tanto nas entradas por precipitação, escoamento superficial e ascensão capilar, e nas saídas para atmosfera por evapotranspiração, para os rios a partir do escoamento superficial quanto para o lençol freático por percolação profunda. Os ecossistemas florestais desempenham um papel fundamental na captação e redistribuição de água da chuva, sendo elemento fundamental para a conservação da água e do solo (De Oliveira Melo Neto *et al.*, 2019).

As funções hidrológicas das florestas podem ser explicadas no contexto do ciclo hidrológico, da seguinte forma: quando a precipitação atinge a vegetação uma parte dela é fracionada, retida e redistribuída na superfície do solo, pela cobertura vegetal (dossel, estratos inferiores, tronco, serapilheira), cujo processo é denominado interceptação (Mello *et al.*, 2024; De Oliveira Melo Neto *et al.*, 2019 e Rodrigues *et al.*, 2021).

A água retida pela massa vegetal, uma parte dela evapora para a atmosfera, e uma outra parcela escoar pelo tronco, tem-se ainda uma parte que goteja do dossel e chega a superfície do solo (Junqueira Júnior *et al.*, 2019, Lian *et al.*, 2022). A soma da transprecipitação e o gotejamento do dossel caracteriza a precipitação interna, enquanto a soma do escoamento pelo tronco e a precipitação interna formam a precipitação efetiva (Oliveira *et al.*, 2024).

Com a decorrência de interceptação que acontece acima do dossel e abaixo (na serapilheira) há o retardamento do processo de escoamento superficial, diminuição da energia cinética das gotas de chuva protegendo o solo contra o efeito de salpico e favorecendo a infiltração da água no solo (De Oliveira Melo Neto *et al.*, 2019).

Após a interceptação, a água da chuva atinge a superfície do solo e infiltra, o que é influenciado pela estrutura do solo, estados de umidade do solo (Lian *et al.*, 2022; Porada *et al.*, 2018). Uma parte da água escoar sobre a superfície do solo em direção às partes mais baixas do relevo, como é o caso de leitos, vales e cursos de água para o recarregamento de aquíferos (Lian *et al.*, 2022). Além disso, durante o lento movimento da água no solo, conhecido como percolação, uma parte é absorvida pelas raízes das plantas (Lian *et al.*, 2018). O restante da água presente no solo flui para zona saturada (abaixo da zona radicular), a qual propicia a formação do escoamento base (Rodrigues *et al.*, 2021)

De forma geral, a interceptação do dossel à precipitação pode ser considerado um processo-chave no ciclo de água por garantir a redistribuição de água e por contribuir para a regulação da água de infiltração para umidade do solo em ecossistemas florestais (Gardon *et al.*, 2020). Mas é importante referir que a interceptação do dossel varia de acordo com as características únicas da floresta (espécies e densidade das espécies vegetais), condições climáticas, padrões de precipitação, condições de umidade antecedente, velocidade e direção dos ventos (Lian *et al.*, 2022; Mello *et al.*, 2024; Oliveira *et al.*, 2024).

Para o bioma da Mata Atlântica, estudos afirmam que a interceptação das chuvas pelo dossel pode atingir 32,4% da precipitação bruta (Rodrigues *et al.*, 2021). No estudo realizado na FESM (a mesma área do presente estudo) pelos mesmos autores, entre 2013 e 2019, observaram um acúmulo 21% da interceptação do dossel à precipitação bruta (externa), e a sua variação foi de 16 a 24%, sendo que nos anos secos a interceptação foi maior.

Uma outra componente importante no ciclo hidrológico relacionado a cobertura vegetal em ecossistemas florestais é a evapotranspiração, que é uma das variáveis de água no ecossistema florestal. A evapotranspiração consiste em uma parcela do balanço hídrico, na qual a água sofre uma transformação do seu estado físico, passando a vapor por meio de uma série de interações energéticas (radiação líquida e temperatura do ar) (Mello *et al.*, 2019) e déficit de pressão de vapor (Tang *et al.*, 2021). Em nível global, a evapotranspiração estimada é de aproximadamente 1,3 mm/dia, o que corresponde a 60% da precipitação que atinge a superfície terrestre (Chang *et al.*, 2018), mas esta quantidade pode variar entre os diferentes biomas (Kozii *et al.*, 2020).

A evapotranspiração em ecossistemas florestais, engloba a evaporação (nas superfícies do solo, da copa junto com a serapilheira molhada durante e após a chuva) e a transpiração, e essas dois elementos são controlados de diferentes maneiras, atuando de forma diferente às mudanças nas condições ambientais e na dinâmica da vegetação (Kozii *et al.*, 2020).

De forma específica, a evaporação ocorre ao longo do ano e é fortemente controlada pelo déficit de pressão de vapor, umidade da superfície e condutância aerodinâmica, enquanto a transpiração ocorre durante o crescimento das plantas regida por processos fisiológicos das plantas que acontece com abertura estomática quando as plantas absorvem CO<sub>2</sub> para a fotossíntese (Chang *et al.*, 2018; Guauque-Mellado, *et al.*, 2022, Tang *et al.*, 2021)

A transpiração das plantas está relacionada ao uso da água do solo, que é absorvida e conduzida através dos condutos das raízes e do caule até atingir as folhas onde é transmitida para a atmosfera na forma de vapor. Estes processos de transpiração assim como a absorção da água no solo, está associado a fatores biológicos da planta, como espécie, variações na

condutância estomática das folhas, fenologia das plantas, propriedades anatômicas das árvores, e estrutura do dossel, profundidade de enraizamento, aliadas à fatores ambientais, como radiação solar, velocidade do vento, déficit de pressão de vapor atmosférico e disponibilidade de água no solo (Bretfeld *et al.*, 2018; Mello *et al.*, 2019; Tang *et al.*, 2021).

A transpiração das plantas, tal como foi observado nos estudos, corresponde a 80% a 90% da evapotranspiração total da superfície (Chang *et al.*, 2018), e esta proporção da transpiração por ET, pode ser usada como uma medida da resiliência de ecossistemas a às mudanças nas condições hidroclimáticas. Em algumas formações florestas vulneráveis ao estresse hídrico, as árvores absorvem as águas profundas como mecanismo de resistir à seca (Bretfeld *et al.*, 2018; Guauque-Mellado, *et al.*, 2022).

Por tanto, é importante entender sobre quais condições a taxa de transpiração das espécies representativas da Mata Atlântica pode ser limitada em condições de seca, tendo em conta os níveis de armazenamento da água no solo, distribuição das raízes no perfil do solo e da biomassa acima da superfície. Assim, os resultados vão contribuir no entendimento da resiliência das espécies ao fenômeno de secas nos ecossistemas.

### **2.3 Balanço hídrico**

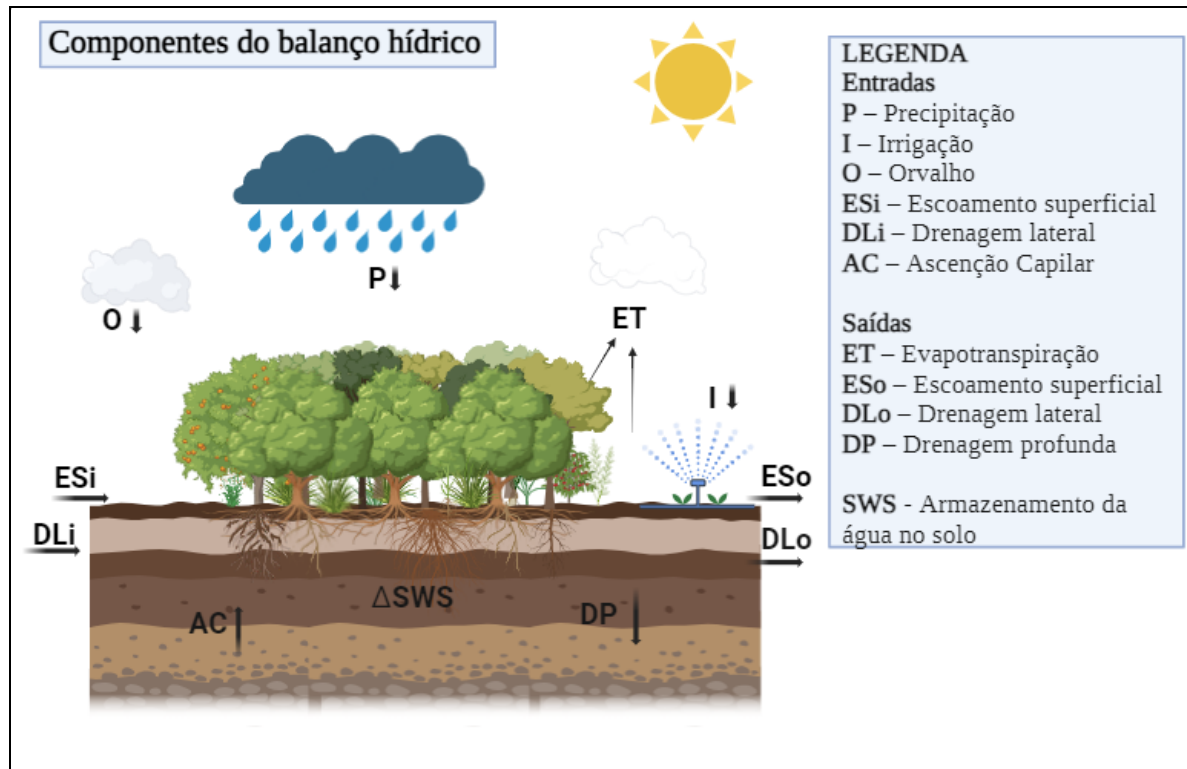
O balanço hídrico consiste na avaliação do fluxo de água em uma determinada área, levando-se em consideração os fluxos de entrada e saída de água, bem como as variações de armazenamentos da água no solo ou em cursos hídricos ao longo do tempo. É essencial para entender a disponibilidade e a distribuição de água e os momentos de estresse ou déficit hídrico em uma região, possibilitando o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos (Rhoden *et al.*, 2016). No caso das áreas florestais, o balanço hídrico, refere-se à capacidade da vegetação de manter o equilíbrio hídrico dinâmico da atmosfera-vegetação-solo durante o processo de crescimento de longo prazo (Han *et al.*, 2024)

Tendo em conta as diferentes abordagens, com o balanço hídrico pode-se analisar o armazenamento de água no solo e o comportamento da evapotranspiração na escala de bacia hidrográfica ou áreas de cobertura vegetal, simular o escoamento superficial, identificar os períodos secos e úmidos e para a classificação do clima de uma região (Pakparvar *et al.*, 2018).

Tal como ilustra a Figura 2.1, no balanço hídrico, conta-se com as componentes de entrada e saída de água em um perfil de solo, considerando como volume de controle, em um determinado intervalo de tempo. Segundo Villa *et al.* (2022) a precipitação/irrigação, orvalho,

e ascensão capilar são os principais componentes de entrada de água enquanto a evapotranspiração, escoamento superficial, drenagem lateral e drenagem profunda que são responsáveis por mais de 85% de saída ou perda de água.

Figura 1.1 – Representação esquemática dos fluxos do balanço hídrico



Fonte: Autor

A diferença entre as entradas e saídas de água é o que determina a variação do armazenamento de água no solo e a equação geral para o balanço hídrico é:

$$\Delta SWS = P + O + ESi + DLi + AC - ET - ESo - DLo - DP \quad (2.1)$$

Onde: P é a precipitação, O é o orvalho, ESi é o escoamento superficial, DLi é a drenagem lateral de entrada, AC é a ascensão capilar, ET é a evapotranspiração, ESo é o escoamento superficial, DLo é drenagem lateral de saída, DP é a drenagem profunda e  $\Delta SWS$  é a variação de água armazenada no solo. Para fins agrícolas, o modelo trabalhado e desenvolvido para estimar o balanço hídrico de uma região é descrito por Thornthwaite e Mather (1955) cuja sua equação é seguinte:

$$BHC = CAD * P * ETp \quad (2.2)$$

Onde BHC é o balanço hídrico climatológico, CAD capacidade de armazenamento de água no solo (mm), P é precipitação (mm) e ETp é a evapotranspiração potencial (mm). Essas três variáveis permitem determinar a evapotranspiração real (ETr), a deficiência (DEF) ou o excedente hídrico (EXC) e o total de água armazenada no solo (SWS).

O modelo Thornthwaite e Mather tem sido modificado e utilizado em vários estudos para se conhecer e controlar o armazenamento de água no solo, considerando a textura do solo, profundidade das raízes e as entradas e saídas de água, sendo propício para caracterizar os períodos secos (deficiência hídrica) e úmidos (excedente hídrico) em uma determinada região (Villa *et al.*, 2022).

Para o cálculo do balanço hídrico é necessário a estimativa ou medições precisas de precipitação (P), evapotranspiração (ET), variação do armazenamento de água na zona radicular ( $\Delta S$ ) e fluxo de água abaixo da zona radicular (resíduo do balanço hídrico) (Jones *et al.*, 2017). Para tal, é necessário o levantamento de um conjunto de dados em estações meteorológicas e o monitoramento in situ da umidade do solo.

Os dados de P são obtidos através de monitoramento usando pluviômetros,  $\Delta S$  através do monitoramento da umidade do solo usando sensores. A ET é obtida através de dados meteorológicos usando um modelo específico, como Penman – Monteith (Allen *et al.*, 1998). A obtenção de dados de fluxo de água abaixo da zona radicular (Dr) pode ser de custo alto, uma vez requer a instalação de lisímetros, piezômetros ou tensiômetros capilares (Villa *et al.*, 2022). Como alternativa, calcula-se a Dr como o resíduo do balanço hídrico quando os demais elementos são conhecidos (Villa *et al.*, 2022). Mas tendo em conta que em floresta tropicais o Dr é negativo devido a baixos níveis de P ou seja toda água de chuva é armazenada até a zona radicular (Mello *et al.*, 2019), calcula-se a ET como o balanço hídrico, negligenciando o Dr (Jones *et al.*, 2017).

A ET da vegetação é um dos maiores fluxos de água na superfície da terra, sendo importante para a determinação da eficiência do uso da água e para estimativa do balanço hídrico no sistema (Han *et al.*, 2024).

Ao longo do tempo, vários estudos foram realizados no sentido de descrever e avaliar as interações de umidade do solo e outros elementos do balanço hídrico tais como evapotranspiração, fluxos de água e interceptação de chuva pelo dossel nas formações florestais e bacias hidrográficas (Fries *et al.*, 2020; Jones *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2020), sendo que resultados distintos foram obtidos em relação à variação de umidade no solo.

Nos estudos realizados na FESM em condições de seca Rodrigues *et al.* (2021) constataram que a intensificação dos períodos secos alterou a hidrologia da floresta, desencadeando uma resposta fisiológica das espécies para lidar com escassez hídrica. Por outro lado, Guauque-Mellado *et al.* (2022), avaliando a evapotranspiração e os componentes do balanço hídrico, notaram uma variação do fluxo de água abaixo da zona radicular (Dr), o que culminou com a redução no fluxo de água nas camadas mais profundas do solo.

Assim, estudos relacionados ao conhecimento do balanço hídrico em remanescentes como a FESM que consideram a concentração da biomassa subterrânea, além de variáveis da hidrologia florestal e características físico-hídricas do solo, podem ajudar a elucidar questões sobre a dinâmica da água em períodos de seca no ecossistema da Mata Atlântica e, assim, atestar sobre a resiliências das espécies a essas condições extremas.

## **2.4 Umidade do solo**

A umidade do solo é uma variável hidrológica essencial para a compreensão da dinâmica dos processos hidrológicos, como infiltração, recarga de água subterrânea (percolação profunda), escoamento superficial, erosão do solo e transporte de sedimentos, evapotranspiração dentre outros processos ecohidrológicos (Gwak e Kim, 2017; Junqueira Júnior *et al.*, 2017).

A umidade do solo influencia vários processos nos ecossistemas, como a pedogênese, abundância e o tipo de vegetação, assim como a disponibilidade dos nutrientes. Ademais, a umidade do solo pode afetar negativamente o ecossistema florestal, causando diminuição da fotossíntese e do crescimento das raízes, mudanças fenológicas e aumento da susceptibilidade das doenças nas plantas (Dymond *et al.*, 2014).

A cobertura e o desenvolvimento da vegetação em ecossistemas florestais, aliados a práticas de manejo de vegetação, regime de chuvas, a evaporação, a temperatura, as características do solo (textura, densidade, porosidade), constituem elementos fundamentais que influenciam na quantidade de água retida ou armazenada no solo (Barbosa *et al.*, 2019; De Queiroz *et al.*, 2020). Isto significa que a interceptação pelo dossel e a evapotranspiração no ecossistema florestal controlam, respectivamente, a precipitação interna e a variação do armazenamento da água no solo (Liu *et al.*, 2020). Por tanto, torna importante o conhecimento desses elementos da hidrologia florestal para o entendimento do armazenamento de água no solo (Liu *et al.*, 2020).

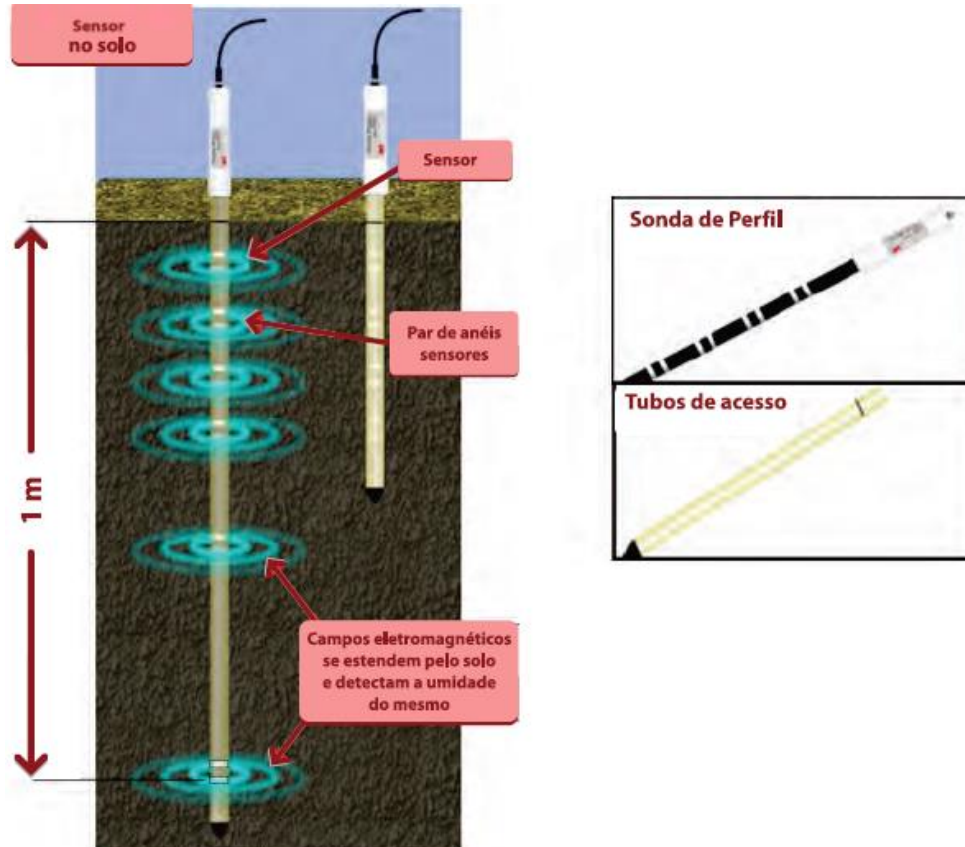
A água armazenada no solo é transformada em umidade disponível para a zona radicular das plantas. A umidade na zona radicular é uma variável hidrológica importante, que impacta processos hidrológicos relevantes, com destaque para as florestas e estudos relacionados ao clima (Carranza *et al.*, 2021). Em período de baixa umidade do solo, sobretudo no período seco, as árvores sofrem estresse hídrico, o que compromete as funções fisiológicas das mesmas (Colliander *et al.*, 2020).

Apesar de Guauque-Mellado *et al.* (2022) na FESM terem observado que algumas espécies florestais podem lidar com diferentes níveis de severidade de secas devido a mecanismos fisiográficos adotados, tais como a deciduidade, tamanho das folhas, controle estomático e absorção de água em camadas mais profundas, as secas prolongadas podem ser impactantes para muitas espécies. Tais secas podem afetar a distribuição das espécies e os bens e serviços fornecidos pela floresta (Meir *et al.*, 2018), causando declínio da umidade do solo, deixando o percentual de água disponível para as plantas no solo abaixo dos níveis críticos (Saatchi *et al.*, 2013).

Desta forma, o monitoramento da umidade do solo, sobretudo nas formações florestais é muito relevante em várias escalas espaciais (Sadeghi *et al.*, 2015) e temporais, para determinação da quantidade de água armazenada no solo coberto por uma vegetação e condições hídricas em que o solo se encontra (Junqueira Júnior *et al.*, 2017).

Vários sensores eletromagnéticos para monitoramento de umidade do solo foram desenvolvidos para medições contínuas do teor volumétrico de água no solo, *in situ* (Brakhasi *et al.*, 2024; Carranza *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2024). Um dos exemplos é da FDR (Frequency Domain Reflectance) PR2/6 da Delta-T (Figura 2.2), que é um dispositivo de medição portátil que mantém a estrutura do solo e fornece leituras em profundidade, usado por Giese *et al.* (2019) em fileiras de árvores de eucalipto.

Figura 2.2 – Sonda de perfil FDR (Frequency Domain Reflectance) PR2/6 da Delta-T, medindo a umidade volumétrica do solo aos 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm 60 cm e 100 cm de profundidade.



Fonte: Giese *et al.* (2019)

Apesar dos avanços no que diz respeito ao monitoramento da umidade no solo, ainda há escassez de estudos comparativos em diferentes tipos de superfícies, uma vez que ela flutua consideravelmente no tempo e no espaço, dificultando a caracterização (De Queiroz *et al.*, 2020). Por tanto, análises de variabilidade espaço-temporal da umidade do solo dentro e entre diferentes tipos de vegetação são importantes para a compreensão dos processos eco-hidrológicos e para o desenvolvimento sustentável de ecossistemas (Zhu *et al.*, 2020). Outras análises importantes são de estabilidade temporal, utilizadas em longa escala, auxiliam na identificação de locais específicos que são relativamente estáveis ao longo do tempo e podem representar bem áreas de estudo inteiras (De Queiroz *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2020).

Assim, estudos que promovam a compreensão da variação do armazenamento da água no perfil do solo com a concentração da biomassa de raízes podem assumir um papel fundamental para compreender a dinâmica da evapotranspiração nas espécies representativas

do ecossistema da Mata Atlântica. Neste contexto é importante associar outras variáveis da hidrologia florestal, como a precipitação efetiva (precipitação interna e escoamento pelos troncos), interceptação, biomassa acima da superfície do solo e as propriedades hidrológicas do solo.

## 2.5 Biomassa florestal subterrânea

A biomassa subterrânea tem representação diferenciada nas diversas formações florestais e sua contribuição é muito significativa para a composição da biomassa florestal total (Ratuchne *et al.*, 2016) e desempenha um papel importante no funcionamento e desempenho das plantas (Freschet *et al.*, 2021) e no ciclo biogeoquímico (Addo-Danso *et al.*, 2016).

A biomassa subterrânea da vegetação compreende todos os órgãos vivos localizados abaixo da linha do solo, com a função de fixar e sustentar a vegetação, absorver água e nutrientes e sintetizar os hormônios reguladores de crescimento (Ratuchne *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2024b). Ela corresponde a 20% a 40% do total da biomassa da árvore (Acuña-Míguez *et al.*, 2023). É através da biomassa subterrânea que a floresta conecta a atmosfera ao solo através da absorção água do solo e pelas trocas gasosas na copa, as quais consistem na absorção do carbono e transpiração, formando assim uma relação contínua no sistema solo-planta-atmosfera.

O sistema radicular é categorizado de acordo com o tamanho do seu diâmetro, sendo dividido em raízes grossas e finas (Ribeiro *et al.*, 2024b). Embora não haja consenso na literatura sobre as categorias de raízes, alguns autores consideram que as raízes finas são aquelas que apresentam um diâmetro  $\leq 2$  ou  $< 5$  mm (Morais *et al.*, 2017; Ratuchne *et al.*, 2016) e  $\leq 2$  mm (Addo-Danso *et al.*, 2016; Kulmann *et al.*, 2022), enquanto as raízes grossas são aquelas com um diâmetros acima de 5 mm (Morais *et al.*, 2017; Ratuchne *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2024b). As raízes grossas são responsáveis pela fixação das plantas ao solo, garantindo estabilidade à formação florestal e são abundantes nas camadas mais profundas, enquanto as raízes finas têm a função de absorção de água e nutrientes e sintetizar os hormônios reguladores de crescimento, são abundantes nas camadas mais superficiais, podendo ir até 5m de profundidade (Basílio *et al.*, 2024; Ratuchne *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2024b).

A distribuição das raízes no solo está relacionada ao genótipo da espécie (Abramoff; Finzi, 2015), e pode ser influenciada por outros fatores inerentes ao solo, como fertilidade,

densidade, disponibilidade de oxigênio, textura, profundidade, temperatura e, também, pelas circunstâncias em que a espécie se desenvolve num meio de competição por espaço com as outras árvores (Valverde-Barrantes *et al.*, 2015). Para o caso da Mata Atlântica a quantidade de biomassa acumulada pela vegetação é considerada maior quando comparado com os outros biomas brasileiros (Ratuchne *et al.*, 2016).

Por tanto, o conhecimento sobre a densidade e distribuição de raízes no solo em ecossistema florestal é muito crucial, apesar das metodologias usadas serem onerosas e intensivas, podendo causar perturbações no meio ambiente durante a amostragem (Ribeiro *et al.*, 2024b).

Entretanto, os métodos para a quantificação da biomassa florestal que podem ser usados são indiretos e diretos (Addo-Danso *et al.*, 2016 e Ratuchne *et al.*, 2016). Os métodos indiretos consistem em estimar a quantidade de raízes por meio de relações empíricas entre a biomassa e outras variáveis obtidas em inventário florestal, tais como o diâmetro a altura do peito (DAP), altura e volume da árvore (Lehtonen *et al.*, 2016; Ratuchne *et al.*, 2016). Os métodos diretos consistem em determinar a quantidade de raízes através de amostragem, destruição e pesagem e são bastantes trabalhosos (Addo-Danso *et al.*, 2016 e Ratuchne *et al.*, 2016). Eles podem ser por escavação, por monólitos (usado no presente trabalho) ou por tradagem (Ratuchne *et al.*, 2016). Apesar de ser métodos mais trabalhosos, os métodos diretos, quer seja por monólitos ou por tradagem são mais recomendáveis em áreas florestais onde ainda não há informações sobre a biomassa radicular (Ratuchne *et al.*, 2016).

Assim, as estimativas da biomassa radicular para o presente estudo é relevante, uma ajudará na compreensão da sua variação no perfil do solo, e a sua relevância na variação do armazenamento da água no solo do remanescente da FESM, sobretudo no período seco.

## **2.6 Biomassa florestal acima da superfície**

A biomassa florestal, para além de ser um servir como indicador importante da capacidade que a vegetação tem no sequestro do carbono (Wang *et al.*, 2019), desempenha um papel importante na análise e compreensão completa da natureza dos ecossistemas florestais e dos procedimentos econômicos de crescimento da vegetação (Zeng *et al.*, 2022).

Do total da biomassa florestal, cerca de 70% a 90% corresponde a biomassa acima do solo (AGB) (Zeng *et al.*, 2022), sendo esta a maior fração, com destaque para as florestas tropicais (Ploton *et al.*, 2016). A AGB inclui árvores, arbustos e videiras (Lu *et al.*, 2016).

A estimativa da AGB fornece informações de extrema relevância para decisões relacionadas ao manejo florestal e às políticas climáticas (Lu *et al.*, 2016, Wang *et al.*, 2019). Mesmo assim, ainda é um desafio estimular a AGB no sentido de obtenção de dados precisos em ecossistemas florestais. Os métodos de estimativa de biomassa em campo são os mais precisos, mas consomem muito tempo e mão de obra (Lu *et al.*, 2016). Em grandes áreas o uso de dados de sensoriamento remoto é importante para o mapeamento de da distribuição da AGB, mas é dependente de estimativa de AGB in situ em parcelas amostrais para calibração e validação de modelos (Wang *et al.*, 2019).

Portanto, a AGB é geralmente prevista por equações alométricas empiricamente derivadas que utilizam medições do tamanho de uma árvore individual como preditores de sua massa (Ploton *et al.*, 2016). Neste caso, são necessárias as medições do diâmetro à altura do peito (D) e a altura total da árvore (H), usados para capturar variações de volume entre as árvores e a densidade da madeira ( $\rho$ ) para converter volume em massa seca (Ploton *et al.*, 2016).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMOFF, R. Z. e FINZI, A. C. **Are above- and below-ground phenology in sync?** *New Phytologist* v. 205, p. 1054-1061. 2015.
- ACUÑA-MÍGUEZ, B. *et al.* **Increased recovery in coarse-root secondary growth improves resilience to drought in transition forests.** *Journal of Ecology*, v. 111, n. 1, p. 170-181, 2023.
- ADDO-DANSO, S. D., PRESCOTT, C. E. e SMITH, A. R. **Methods for estimating root biomass and production in forest and woodland ecosystem carbon studies: A review.** *Forest Ecology and Management*. v. 359, p. 332-3511, 2016.
- ALLEN, R. G. *et al.* **Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements.** Rome: FAO, 1998.
- BARBOSA, R. A. *et al.* **Variação temporal da umidade do solo sob diferentes coberturas vegetais.** *Revista Ifesciência*, v.5. Número 2. p. 11-23, 2019 DOI: 10.36524/ric.v5i2.443
- BASÍLIO, J. J. N. *et al.* **Fine Root Density Dynamics and Carbon Stock of Eucalyptus spp.: Interplay of Age, Genotype, and Edaphoclimatic Conditions.** *Plants*, v. 13, n. 11, p. 1503, 2024.
- BRAKHASI, F. *et al.* **Soil moisture profile estimation under bare and vegetated soils using combined L-band and P-band radiometer observations: An incoherent modeling approach.** *Remote Sensing of Environment*, v. 307, p. 114148, 2024.
- BRETFELD, M. *et al.* **Plant water use responses along secondary forest succession during the 2015–2016 El Niño drought in Panama.** *New Phytologist*, v. 219, n. 3, p. 885-899, 2018.
- CARRANZA, C. NOLET, C. PEZIJ, M. e PLOEG, M. **Root zone soil moisture estimation with Random Forest.** *Journal of Hydrology*. v. 593, 125840. 2021.
- CHANG, L. *et al.* **Why do large-scale land surface models produce a low ratio of transpiration to evapotranspiration?** *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 123, n. 17, p. 9109-9130, 2018.

CHEN, L., WANG, J., WEI, W., FU, B. e WU, D. **Effects of landscape restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau Region, China.** *Forest Ecology and Management* v. 259, p. 1291-129820. 2010.

COLLIANDER, A. *et al.* **SMAP detects soil moisture under temperate forest canopies.** *Geophysical research letters*, v. 47, n. 19, p. e2020GL089697, 2020.

DE LIMA, R. A. F. *et al.* **Comprehensive conservation assessments reveal high extinction risks across Atlantic Forest trees.** *Science*, v. 383, n. 6679, p. 219-225, 2024.

DE LIMA, R. A. F. *et al.* **The erosion of biodiversity and biomass in the Atlantic Forest biodiversity hotspot.** *Nature communications*, v. 11, n. 1, p. 6347, 2020.

DE LIMA, R. A. F. *et al.* **Defining endemism levels for biodiversity conservation: tree species in the Atlantic Forest hotspot.** *Biological Conservation*, v. 252, p. 108825, 2020.

DE OLIVEIRA MELO NETO, J. *et al.* **Comportamento físico da precipitação interna em um povoamento de Eucalyptus.** *Ciência Florestal (01039954)*, v. 29, n. 3, 2019.

DE QUEIROZ, M.G. *et al.* **Spatial and temporal dynamics of soil moisture for surfaces with a change in land use in the semi-arid region of Brazil.** *Catena*, v. 188, p. 104457, 2020

DENG, S. *et al.* **On the development and recovery of soil moisture deficit drought events.** *Journal of Hydrology*, v. 632, p. 130920, 2024.

DIAS, T. C., SILVEIRA, L. F., FRANCISCO, M. R. **Spatiotemporal dynamics reveals forest rejuvenation, fragmentation, and edge effects in an Atlantic Forest hotspot, the Pernambuco Endemism Center, northeastern Brazil.** *Plos one*, v. 18, n. 9, p. e0291234, 2023

DYMOND, S. F., KOLKA, R. K., BOLSTAD, P. V. E SEBESTYEN, S. D. **Long-term soil moisture patterns in a northern Minnesota forest.** *Soil Science Society of America Journal*, v. 78, n. S1, p. S208-S216, 2014.

FANTOZZI, D. *et al.* **A systematic review of studies on fine and coarse root traits measurement: towards the enhancement of urban forests monitoring and management.** *Frontiers in Forests and Global Change*, v. 7, p. 1322087, 2024.

FRESCHET, G. T. *et al.* **A starting guide to root ecology: strengthening ecological concepts and standardising root classification, sampling, processing and trait measurements.** *New Phytologist* v. 232, p. 973-1122, 2021.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Relatório Anual de Atividades 2017.** São Paulo, p.107. 2018. Disponível em: <[https://www.sosma.org.br/wp-content/uploads/2018/10/AF\\_RA\\_SOSMA\\_2017\\_web.pdf](https://www.sosma.org.br/wp-content/uploads/2018/10/AF_RA_SOSMA_2017_web.pdf)>. Acesso em: 19/06/2024

FRIES, A., SILVA, K., PUCHA-COFREP, F., OÑATE-VALDIVIESO, F. e OCHOA-CUEVA. **P. Water Balance and Soil Moisture Deficit of Different Vegetation Units under Semiarid Conditions in the Andes of Southern Ecuador.** *Climate*, 8, 30; 2020. doi:10.3390/cli8020030.

GAO, L. *et al.* **Can shallow-layer measurements at a single location be used to predict deep soil water storage at the slope scale?** *Journal of Hydrology* v. 531, Part 3, p. 534-542. 2015.

GARDON, F. R. *et al.* **Rainfall interception and plant community in young forest restorations.** *Ecological Indicators*, v. 109, p. 105779, 2020.

GIESE, M. *et al.* **Dinâmica da água em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta.** Capítulo 14, ResearchGate. 2019.

GUAUQUE-MELLADO, D. *et al.* **Evapotranspiration under drought conditions: the case study of 2 a seasonally dry Atlantic Forest.** *Atmosphere* 2022, 13, x. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>

GUERRINI, I. A. *et al.* **Evaluating carbon stocks in soils of fragmented Brazilian Atlantic Forests (BAF): How soil features and different methodologies influence its assessment.** 2023.

HAN, Q. *et al.* **Water Balance Characteristics of the Salix Shelterbelt in the Kubuqi Desert.** *Forests*, 15(2), 278; 2024 <https://doi.org/10.3390/f15020278>.

HOU, Y. *et al.* **Forest disturbance thresholds on summer low flows in the interior of British Columbia, Canada.** *Catena*, v. 243, p. 108173, 2024.

HOU, Y. WEI, X. **Forest disturbance thresholds and cumulative hydrological impacts.** *Water Resources Research*, v. 60, n. 5, p. e2024WR037339, 2024.

JONES, H. *et al.* **Water balance, surface conductance and water use efficiency of two young hybrid-poplar plantations in Canada's aspen parkland.** *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 246, n. August 2016, p. 256–271, 2017.

JUNQUEIRA JUNIOR J. A. *et al.* **Rainfall partitioning measurement and rainfall interception modelling in a tropical semi-deciduous Atlantic Forest remnant.** *Agricultural and Forest Meteorology* v. 275, p.170-183. 2019.

JUNQUEIRA JUNIOR, J. A., *et al.* **Time-stability of soil water content (SWC) in an Atlantic Forest - Latosol site.** *Geoderma* 288, 64–78, 2017.

KOZII, N. *et al.* **Partitioning growing season water balance within a forested boreal catchment using sap flux, eddy covariance, and a process-based model.** *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 24, n. 6, p. 2999-3014, 2020.

KULMANN, M. S. S. *et al.* **Physicalchemical aspects of the soil influence the fine roots parameters of *Pinus elliottii* Engelm. stand in southern of Brazil.** *Scientia Forestalis*, 50, e3839. 2022. <https://doi.org/10.18671/scifor.v50.17>

LEHTONEN, A. *et al.* **Modelling fine root biomass of boreal tree stands using site and stand variables.** *Forest ecology and management*, v. 359, p. 361-369, 2016.

LIAN, X. ZHAO, W. GENTINE, P. **Recent global decline in rainfall interception loss due to altered rainfall regimes.** *Nature Communications*, v. 13, n. 1, p. 7642, 2022.

LIU, M. *et al.* **Influence of canopy and topographic position on soil moisture response to rainfall in a hilly catchment of Three Gorges Reservoir Area, China.** *Journal of Geographical Sciences*, 30 (6): p. 949-968, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11442-020-1764-1>

LU, D. *et al.* **A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems.** *International Journal of Digital Earth*, v. 9, n. 1, p. 63-105, 2016.

MANTOVANI, V. A. *et al.* **Spatial and Temporal Patterns in Carbon and Nitrogen Inputs by Net Precipitation in Atlantic Forest, Brazil.** *Forest Science*, XX, 1–12, 2022. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxab056>

MANTOVANI, V. A. *et al.* **Unprecedentedly high soil carbon stocks and their spatial variability in a seasonally dry Atlantic Forest in Brazil.** *Catena* 235 107696, 2024.

MEIR P. *et al.* **Short-term effects of drought on tropical forest do not fully predict impacts of repeated or long-term drought: gas exchange versus growth.** *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences* 373 p. 1–10. 2018. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0311>

MELLO, C. R. *et al.* **Water balance in a neotropical forest catchment of southeastern Brazil.** *Catena* 173, p. 9–21. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.046>

MELLO, C. R. *et al.* **Deciphering global patterns of forest canopy rainfall interception (FCRI): A synthesis of geographical, forest species, and methodological influences.** *Journal of Environmental Management*, v. 358, p. 120879, 2024.

MORAIS, V. A. *et al.* **Spatial and vertical distribution of litter and belowground carbon in a Brazilian Cerrado vegetation.** *Cerne*, v. 23, n. 1, p. 43-52, 2017.

OLIVEIRA, S. *et al.* **Enhancing global rainfall interception loss estimation through vegetation structure modeling.** *Journal of Hydrology*, v. 631, p. 130672, 2024.

OLIVEIRA, V. A. *et al.* **Spatiotemporal modelling of soil moisture in an Atlantic forest through machine learning algorithms.** *European Journal of soil science*, v. 72, n. 5, p. 1969-1987, 2021.

PAKPARVAR, M. *et al.* **Artificial recharge efficiency assessment by soil water balance and modelling approaches in a multi-layered vadose zone in a dry region.** *Hydrological Sciences Journal* v. 63, 2018.

PLOTON, P. *et al.* **Closing a gap in tropical forest biomass estimation: taking crown mass variation into account in pantropical allometries.** *Biogeosciences*, v. 13, n. 5, p. 1571-1585, 2016.

PORADA, P., VAN STAN, J. T. KLEIDON, A. **Contribuição significativa da vegetação não vascular para a interceptação global de chuvas.** *Nature Geosci* 11 , 563–567 2018. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0176-7>

RATUCHNE, L. C. *et al.* **Estado da arte na quantificação de biomassa em raízes de formações florestais.** *Floresta e Ambiente*; 23(3): p. 450-462, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.131515> ISSN 2179-8087

RHODEN, A. C., FELDMANN, N. A., MUHL, F. R., RITTER, A. F. S. e MOREIRA, A. **A importância da água e da gestão dos recursos hídricos.** *Revista de Ciências Agroveterinárias e Alimentos*, 1, 91-108. 2016.

RIBEIRO *et al.* **Importância ecossistêmica das raízes: Uma revisão de literatura.** *Research, Society and Development*, v. 13, n. 2, e12813245165, 2024.

RIBEIRO, J. A. H. *et al.* **Influência de diferentes módulos de produção agroflorestal na biomassa de raízes finas no sudeste da Amazônia.** *Research, Society and Development*, v. 13, n. 2, e12813245165, 2024.

RODRIGUES, A. F. *et al.* **Modeling canopy interception under drought conditions: The relevance of evaporation and extra sources of energy.** *Journal of Environmental Management* 292, 112710, 2021a.

RODRIGUES, A. F. MELLO, C. R., TERRA, M. C. N. S. e BESKOW, S.B **Water balance of an Atlantic Forest remnant under a prolonged drought period.** *Ciência e Agrotecnologia*, 45: e008421, 2021b. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202145008421>.

RODRIGUES, A. F. *et al.* **Soil water content and net precipitation spatial variability in an Atlantic Forest remnant.** *Acta Scientiarum - Agronomy*, v. 42, p. 1–13, 2020.

RODRIGUES, A. F. *et al.* **Throughfall spatial variability in a neotropical forest: Have we correctly accounted for time stability?** *Journal of Hydrology*. v. 608, 127632. 2022.

SAATCHI, S. *et al.* **Persistent effects of a severe drought on Amazonian Forest canopy.** Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 110, n. 2, p. 565-570, 2013.

SADEGHI, M., JONES, S. B., PHILPOT, W. D. **A linear physically-based model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands.** Remote Sensing of Environment 164 p. 66–76 2015.

SANTOS, P. Z. F.; CROUZEILLES, R.; SANSEVERO, J. B. B. **Can agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem service provision in agricultural landscapes? A meta-analysis for the Brazilian Atlantic Forest.** Forest ecology and management, v. 433, p. 140-145, 2019.

SAVELLI, E. *et al.* **Drought and society: Scientific progress, blind spots, and future prospects.** Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, v. 13, n. 3, p. e761, 2022.

SCOLFORO, H. F. *et al.* **A new model of tropical tree diameter growth rate and its application to identify fast-growing native tree species.** Forest Ecology and Management, v. 400, p. 578-586, 2017.

SOUZA, R. *et al.* **Resposta da vegetação à sazonalidade das chuvas e à variabilidade interanual em florestas tropicais secas.** Processos Hidrológicos , v. 30, n. 20, p. 3583-3595, 2016.

TANG, Y. *et al.* **Solar energy dominates and soil water modulates net ecosystem productivity and evapotranspiration across multiple timescales in a subtropical coniferous plantation.** Agricultural and Forest Meteorology, v. 300, p. 108310, 2021.

TERRA, M. C. N. S. *et al.* **Stemflow in a neotropical forest remnant: vegetative determinants, spatial distribution and correlation with soil moisture.** Trees, 32 p. 323-335, 2018. Doi:10.1007/s00468-017-1634-3

VALVERDE-BARRANTES O. J., SMEMO K.A. e BLACKWOOD C. B. **Fine root morphology is phylogenetically structured, but nitrogen is related to the plant economics spectrum in temperate trees.** Functional Ecology 29 p. 796–807. 2015.

VILLA, B. *et al.* **Balanco hídrico climatológico: uma revisão.** Research, Society and Development, v. 11, n.6, e 50211626669, 2022.

**WANG, Y. *et al.* In situ biomass estimation at tree and plot levels: What did data record and what did algorithms derive from terrestrial and aerial point clouds in boreal forest.** *Remote Sensing of Environment*, v. 232, p. 111309, 2019.

**ZENG, P. *et al.* Estimativa da biomassa total e componente acima do solo (AGB) florestal por meio de dados SAR polarimétricos de banda C e L.** *Forests*, v. 13, n. 3, p. 442, 2022.

**ZHU, X. *et al.* Soil moisture temporal stability and spatio-temporal variability about a typical subalpine ecosystem in northwestern China.** *Hydrological Processes*, v. 34, n. 11, p. 2401-2417, 2020.

## SEGUNDA PARTE

### **ARTIGO 1 - BALANÇO HÍDRICO EM ESPÉCIES FLORESTAIS REPRESENTATIVAS DA MATA ATLÂNTICA**

#### **RESUMO**

Compreender a capacidade da vegetação da Mata Atlântica na manutenção da dinâmica solo-vegetação-atmosfera é crucial, dado os desafios enfrentados pelos biomas no Brasil devido ao desmatamento e períodos prolongados de seca, especialmente no Sudeste do país. O objetivo desta pesquisa é avaliar o comportamento do balanço hídrico em espécies florestais da Mata Atlântica, em um remanescente da Floresta Estacional Semidecidual Montana (FESM), localizado em Lavras, Minas Gerais. O monitoramento da umidade do solo foi realizado em 7 pontos no interior do remanescente, e das variáveis hidrológicas como, precipitação externa (GR), interceptação do dossel (C), precipitação efetiva (EP), e além da estimativa de biomassa acima da superfície (AGB), amostragem da biomassa de raízes (BR) e propriedades hidrológicas do solo ao longo do perfil até 1,80 m. Os resultados revelaram uma concentração vertical da BR, com maior massa nas camadas superficiais do solo (0-60 cm) que diminuiu gradualmente com a profundidade. As raízes mais finas (< 2 mm) predominam nas camadas superficiais, desempenhando papéis essenciais na absorção de água e na ciclagem de nutrientes, enquanto as raízes intermediárias grossas (5 – 50 mm) são abundantes em camadas mais profundas. No balanço hídrico individualizado por árvore, o padrão das chuvas e as características morfológicas das plantas influenciaram os valores de ET, EP e C. A C acompanhou o regime da EP. Os maiores valores de EP foram observados na *Miconia willdenowii*, enquanto os menores foram na *Xylopia brasiliensis*. Para C, os maiores e menores valores foram observados na *Xylopia brasiliensis*. O armazenamento de água na zona radicular (SWS) mostrou uma tendência de declínio ao longo do período em todos os pontos monitorados, com flutuações influenciadas pelos eventos de chuva, sendo os maiores valores observados nos locais com a *Miconia willdenowii*. A ET foi mais alta em junho para a maioria das árvores, enquanto abril e julho, e setembro para algumas árvores foram os meses mais críticos. As espécies *Miconia willdenowii* e *Copaifera langsdorffii* apresentaram maiores valores da ET. O AGB foi influenciado pelo diâmetro à altura do peito (DAP), apresentando uma correlação forte com a C do que com a ET. No perfil do solo, a umidade do solo mostrou-se menor nas camadas superficiais do que nas camadas mais profundas. As variações temporais (CVt) da umidade do solo foram mais evidentes nas profundidades de 20 cm e 140 cm e as espaciais (CVs) na camada de 0 a 20 cm. O Índice de Estabilidade Temporal (TSI) indicou uma maior estabilidade de SWS no ponto com *Blefarocalice salicifolius*. Este estudo ressalta a importância crítica da água no solo e da perda de água por evapotranspiração nos ecossistemas florestais tropicais, especialmente em condições de seca, e permitindo identificar a(s) espécie(s) que podem ser utilizadas com maior sucesso na recuperação de áreas degradadas.

**Palavras chaves:** Balanço Hídrico; Armazenamento da água no solo; Precipitação Efetiva; Biomassa das raízes e acima da superfície do solo; Evapotranspiração; Mata Atlântica.

## 1 INTRODUÇÃO

O balanço hídrico em formações florestais constitui um fator de grande relevância para a compressão da capacidade que a vegetação tem na manutenção da dinâmica atmosfera-vegetação-solo. Os principais processos envolvidos nessa dinâmica são as trocas gasosas, ciclo da água, ciclo de nutrientes e regulação da temperatura e umidade. Apesar de ser um processo não estático, complexo, com uma elasticidade e uma rede de interações robusta (Han *et al.*, 2024), o balanço hídrico é crucial nas formações florestais tropicais, conhecidas como fornecedoras de diversos serviços ecossistêmicos, tais como a regulação do ciclo hidrológico, a redução do escoamento superficial, percolação profunda da água no solo e ciclagem de nutrientes (Pizarro *et al.*, 2022).

Uma das formações florestais mais relevantes no Brasil é a Mata Atlântica, reconhecida como uma das mais importantes reservas da biosfera do planeta devido à sua capacidade de produção de água e diversidade de espécies endêmicas (Mello *et al.*, 2019). Este tipo de floresta é fundamental para manutenção dos fluxos hídricos no período de estiagem e regulação de extremos máximos de vazões no período úmido em bacias hidrográficas (Junqueira Júnior *et al.*, 2019) garantindo, assim, o abastecimento e o bem-estar de milhões de habitantes com água doce para diversos fins (Ranzini *et al.*, 2022).

Na região Sudeste do Brasil, a Mata Atlântica tem enfrentado períodos de secas prolongadas (Rodrigues *et al.*, 2021), o que ameaça o frágil equilíbrio deste ecossistema. Nesta região, predomina a Floresta Estacional Semidecidual Montana (FESM), uma das formações da Mata Atlântica, estabelecida em zonas de altitude superior a 500 m, abrangendo principalmente áreas interioranas dos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais.

A FESM tem uma relação estreita com a água no solo, o que torna importante o monitoramento da vegetação para obter informações que possam contribuir de forma inovadora para o estabelecimento de estratégias de conservação (Oliveira-Filho *et al.*, 1994). Além disso, é crucial identificar lacunas em pesquisas científicas que precisam ser preenchidas, uma vez que a FESM faz parte das florestas ameaçadas pelo desmatamento.

Desde o ano 2012, vários estudos têm sido realizados em um remanescente da FESM localizado em Lavras, Minas Gerais, para compreender o comportamento espacial e temporal da umidade do solo (Junqueira Júnior *et al.*, 2017; Rodrigues *et al.*, 2020), assim como a influência da vegetação nas entradas e saídas da água no solo através da interceptação (Junqueira Júnior *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2021) e evapotranspiração (Guauque-Mellado *et al.*, 2022), respectivamente, nas condições de seca severa. No entanto, ainda são escassas

informações que correlacionam o comportamento da umidade no perfil do solo com a concentração das raízes das espécies desta formação florestal, bem como o balanço hídrico por espécie representativa, o que é fundamental para o entendimento dos serviços ecossistêmicos oferecidos por essa formação florestal.

A FESM abriga uma variedade de espécies arbóreas, das quais 50% são decíduas, perdendo suas folhas e absorvendo água de camadas mais profundas para enfrentar períodos de seca prolongada (Rodrigues *et al.*, 2021, Mantovani *et al.*, 2022). Portanto, é essencial, aprofundar o entendimento sobre como o armazenamento da água varia no perfil do solo e sua relação com a concentração da biomassa de raízes das espécies e propriedades hidrológicas do solo. Além disso, é necessário considerar outras variáveis da hidrologia florestal inter-relacionais, como precipitação efetiva (EP), a biomassa acima da superfície (AGB), biomassa radicular (BR), interceptação do dossel para entender quanto as árvores perdem de água por evapotranspiração (ET), dentre outras.

Portanto, a questão que o estudo propõe responder é: qual a importância da distribuição das raízes no perfil do solo e da quantidade de biomassa acima da superfície para a resiliência das espécies representativas da Mata Atlântica às secas?

Dessa forma, percebe-se a necessidade de avaliar a variação da umidade no perfil do solo e o monitoramento das outras variáveis hidrológicas (GR C, ET) que atuam acima do dossel em locais onde são encontradas espécies representativas da Mata Atlântica. Isso permitirá avançar na compreensão das relações entre as variáveis hidrológicas e características vegetativas subterrâneas e acima da superfície do solo na dinâmica da água, sobretudo no período seco, em ecossistemas naturais, como é o caso da Mata Atlântica.

Assim, o objetivo geral deste trabalho é de avaliar a dinâmica do balanço hídrico em espécies representativas da Mata Atlântica, com o foco na distribuição das raízes no perfil do solo, biomassa acima da superfície e outras variáveis hidrológicas inter-relacionais, para compreender a resiliência dessas espécies em períodos de secas prolongadas. Os seus objetivos específicos são i) determinar o balanço hídrico individualizado em espécies representativas da Mata Atlântica; ii) avaliar a influência de variáveis hidrológicas inter-relacionadas, como EP, C, SWS e AGB na dinâmica da evapotranspiração em cada espécie representativa; iii) investigar a relação entre a concentração de biomassa radicular, umidade do solo e as propriedades hidrológicas do solo em diferentes profundidades do perfil do solo; e iv) analisar a variação espacial e temporal da umidade do solo e estabilidade do armazenamento da água no solo nas espécies considerando um perfil do solo de 180 cm.

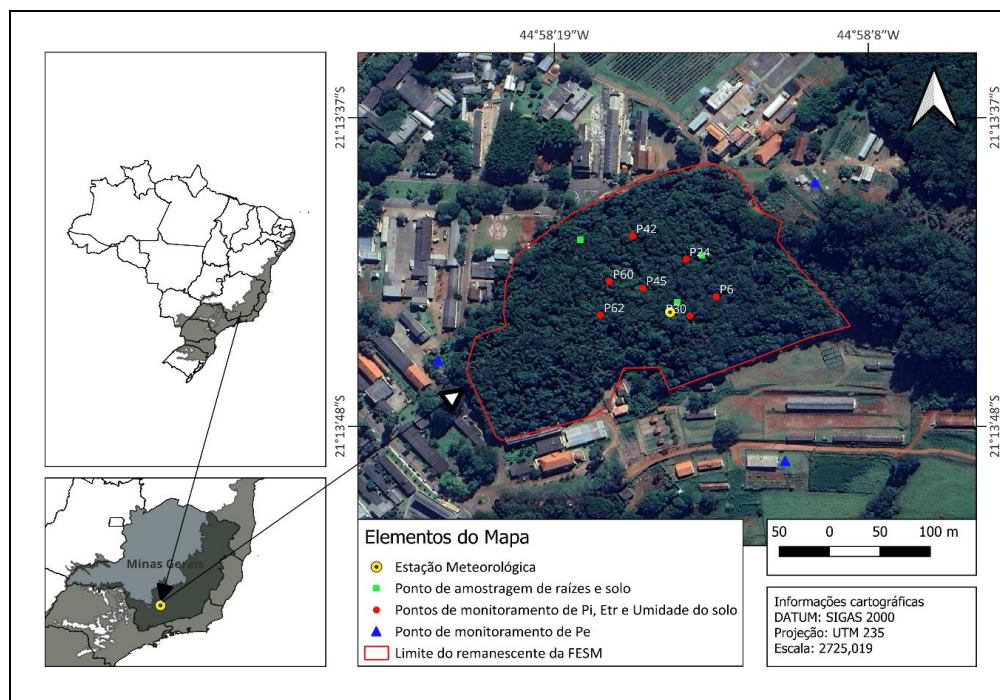
## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Localização e aspectos gerais da área de estudo

A área de estudo está localizada no sudeste do Brasil, no estado de Minas Gerais, nas coordenadas 21°13'40" de latitude sul e 44°57'50" de longitude oeste, com uma altitude média de 925m. (Sousa *et al.*, 2021; Mantovani *et al.*, 2022 e 2023). A área consiste em um remanescente florestal classificado como FESM, uma das formações da Mata Atlântica e que faz parte do Laboratório de Pesquisas Florestais da Universidade Federal de Lavras (UFLA) (Junqueira Júnior *et al.*, 2017; Mantovani *et al.*, 2022).

O remanescente ocupa uma área de 6,35 ha e é circundada por áreas com práticas agroflorestais e urbanas (Figura 2.1). O relevo é suavemente ondulado, com declividade variando de 5 a 15% (Rodrigues *et al.*, 2021b). O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (Mantovani *et al.*, 2023), com uma estrutura granular caracterizada por uma alta porosidade que proporciona uma elevada capacidade de retenção de água e permeabilidade (Guauque-Mellado *et al.*, 2022).

Figura 2.1 – Localização geográfica da FESM, estação meteorológica e dos pontos de monitoramento de precipitação externa (Gr) e interna (TF), escoamento pelo tronco (SF), umidade do solo, amostragem do solo e biomassa de raízes.



Fonte: Do autor (2024)

O clima da região em estudo é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, que apresenta características de um clima subtropical caracterizado com chuvas concentradas no verão (dezembro a março) e estações bem definidas (Mantovani *et al.*, 2022). A precipitação média anual é de 1383,4 mm, dos quais 1186 mm (85,7%) ocorrem entre os meses de outubro e março (período chuvoso) e 197,4 mm (14,3%) ocorrem entre os meses de abril e setembro (período seco). A temperatura média anual é de 20,6°C, variando de 15,7°C em julho a 27,5°C em fevereiro, e a umidade média anual é de 71,0% (INMET, 2020).

A FESM tem uma característica semidecidual, sendo que até 50% das árvores perdem folhas na estação seca (Mantovani *et al.*, 2022 e Rodrigues *et al.*, 2021a). No último censo, realizado em 2017, encontrou-se uma densidade de árvores de 1.021 árvores por hectare, e uma área basal de 120,85 m<sup>2</sup>ha<sup>-1</sup> (Junqueira Júnior *et al.*, 2019; Mantovani *et al.*, 2022).

Na FESM as espécies mais abundantes são: *Copaifera langsdorffii*, (Desf.) (*Fabaceae*) (14,3%); *Xylopia brasiliensis* (Spreng) (*Annonaceae*) (13,7%) e *Miconia willdenowii* (Klotzsch ex Naudin) (*Melastomataceae*) (5,5%), representando 30% da cobertura florestal (Junqueira Júnior *et al.*, 2019; Mantovani *et al.*, 2022 e 2023). Essas espécies têm uma densidade populacional maior na região sudeste do Brasil, o que demonstra sua importância em escala local e regional (Mantovani *et al.*, 2022).

Desde 2012, o monitoramento hidrológico da FESM vem sendo conduzido, com foco nas condições meteorológicas acima e abaixo do dossel, precipitação externa, e interna, escoamento pelo tronco e umidade do solo na camada de 0 – 100 cm. No local existem duas estações meteorológicas, uma abaixo e outra colocada no topo de uma torre meteorológica de 22 m de altura, acima do dossel, para monitorar a precipitação, velocidade e direção do vento, pressão atmosférica, radiação líquida e temperatura do ar/umidade relativa em intervalos de tempo de 15 minutos integradas a uma hora e armazenadas em um *datalogger Hobbo*. Existem pontos definidos correspondentes às parcelas com dimensões de 12 m x 50 m, com uma espécie arbórea representativa para o monitoramento de precipitação interna, escoamento pelo tronco e umidade do solo.

Para o presente estudo, foram definidos 7 pontos equipados com um pluviômetro modelo *Ville de Paris*, com área captação de 400 cm<sup>2</sup>, para monitoramento da precipitação interna, aparato de escoamento no tronco e o tubo de acesso TECANAT PC cravado no solo para medição de umidade do solo. As espécies representativas desses pontos de monitoramento, assim como as suas dimensões que serviram para o balanço hídrico, constam da Tabela 2.1. Foram também definidos 3 pontos para amostragem da biomassa de raízes e do solo no remanescente (Figura 2.1).

Tabela 2.1 – Espécies florestais representativas que serviram para o balanço hídrico no remanescente da FESM.

Número da parcela	Nome científico da árvore	Nome Popular da árvore	Altura (m)	DAP (cm)
42	<i>Blepharocalyx salicifolius</i> (Kunth) <sup>1</sup>	Murta	12,0	19,50
60	<i>Xylopia brasiliensis</i> (Spreng.) <sup>2</sup>	Pindaíba	15,0	17,00
62	<i>Xylopia brasiliensis</i> (Spreng.)	Pindaíba	13,0	18,80
45	<i>Copaifera langsdorffii</i> (Desf.) <sup>3</sup>	Copaíba	16,4	32,10
30	<i>Miconia willdenowii</i> (Klotzsch ex Naudin) <sup>4</sup>	Miconia prateada	12,5	23,10
6	<i>Xylopia brasiliensis</i> (Spreng.)	Pindaíba	15,4	35,00
24	<i>Miconia willdenowii</i> (Klotzsch ex Naudin)	Miconia prateada	13,0	25,00

Fonte: Do autor (2024)

## 2.2 Precipitação bruta

Os dados da precipitação bruta (externa) para o período de avaliação foram obtidos na Estação Climatológica Principal de Lavras, (Convênio UFLA/INMET), localizada a 800 m do remanescente (local do estudo), por meio do site do INMET, com o link de acesso: <http://www.inmet.gov.br/sim/sonabra/dspDadosCodigo.php?ODM2ODc>. A utilização dos dados do INMET foi uma alternativa, pois alguns pluviômetros usados para o monitoramento da precipitação externa estavam danificados, resultando na perda de água captada.

<sup>1</sup> *Blepharocalyx salicifolius* é uma espécie pertencente à família Myrtaceae. Prospera em solos bem drenados e pode tolerar uma variedade de condições climáticas, embora prefira ambientes subtropicais. Esta espécie pode atingir entre 4 e 20 metros de altura e 40 cm de DAP, dependendo das condições ambientais. As folhas são simples, opostas, de forma alongada (lanceoladas) e de coloração verde (Rego *et al.* 2010; Vasconcelos e Proença, 2020).

<sup>2</sup> *Xylopia brasiliensis* é uma espécie perene e heliófita de rápido crescimento, com diâmetro de 30–60 cm e altura de 10–30 m, em árvores maduras. A espécie apresenta folhas simples alternadas, tronco reto e copa cônica. (Miranda *et al.* 2020; Scolforo *et al.* 2017).

<sup>3</sup> *Copaifera langsdorffii* é uma espécie caducifólia e heliófita, é caracterizada por sua capacidade de adaptação em diferentes tipos de vegetação, enfrentando períodos de déficit hídrico. Normalmente, esta espécie apresenta copa densa, diâmetro variando de 50 a 80 cm, altura que atinge 35 m, folhas compostas e casca sulcada (Costa *et al.*, 2010).

<sup>4</sup> *Miconia willdenowii* é uma espécie endêmica brasileira, encontrada em áreas remanescentes da Mata Atlântica. Cresce em matas de terra firme, capoeiras e bordas de florestas, sendo comum em solos bem drenados e áreas de vegetação secundária. A árvore pode atingir alturas de 2 a 5 metros. As folhas são opostas, simples, e geralmente têm uma textura coriácea (espessa e resistente) (Goldenberg *et al.* 2020).

### 2.3 Monitoramento da precipitação interna e escoamento pelo tronco

O monitoramento da precipitação foi feito no interior da floresta abaixo do dossel, denominada precipitação interna (TF), usando pluviômetros fixos do tipo *Ville De Paris* que possuem uma área de captação de 400 cm<sup>2</sup> (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Pluviômetro instalado nos pontos de monitoramento no interior da FESM.



Fonte: Do autor (2024)

As coletas de precipitação foram feitas após cada evento de chuva, respeitando um intervalo de 4h após o término de precipitação ou na manhã seguinte para os eventos que ocorreram de no final da tarde, para garantir o secamento do dossel e para evitar a sobreposição de eventos (Mantovani *et al.*, 2022). A determinação da precipitação por pluviômetro foi baseada na seguinte equação:

$$TF = \frac{V}{A} * 10 \quad (2.1)$$

Onde, TF é a precipitação (mm), V o volume da água captada (ml) e A é a área de captação do pluviômetro (cm<sup>2</sup>).

Quanto ao escoamento pelo tronco, apesar da existência do aparato para a medição, devido aos poucos eventos e para alguns dos pontos de monitoramento, o aparato apresentou problemas. Para o presente estudo foi considerado o percentual de 0,5% em relação à precipitação bruta. Este valor de escoamento foi observado durante 11 anos de monitoramento nesse remanescente (Junqueira Júnior *et al.*, 2017 e Mantovani *et al.*, 2022).

#### 2.4 Precipitação efetiva e precipitação interceptada

Para a determinação da precipitação efetiva (EP), que é a lâmina de água que atinge a superfície do solo, fez-se o somatório da água escoada pelos troncos SF (mm) e a precipitação interna TF (mm) em cada parcela monitorada. Para tal utilizou-se a seguinte equação:

$$EP = TF + SF \quad (2.2)$$

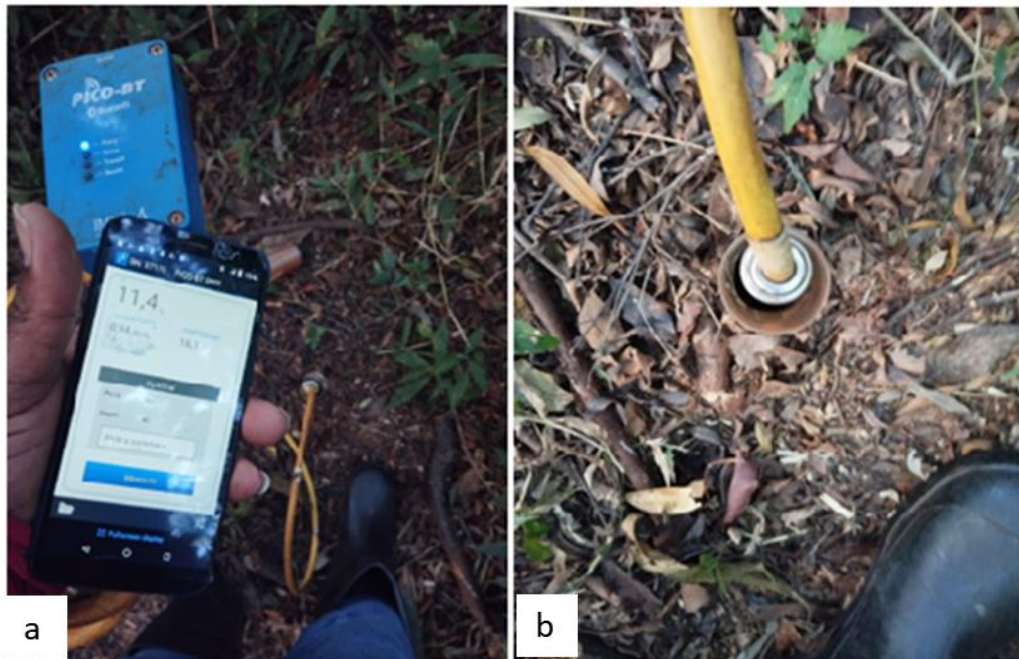
Para a determinação da interceptação da chuva pelo dossel (C) da floresta foram necessárias as seguintes variáveis: precipitação bruta (ou externa) que ocorreu sobre o dossel da floresta (GR) (dados obtidos no INMET), TF e o SF. Assim a chuva interceptada pela floresta foi calculada pela subtração da GR e pela EP (equação 2.3).

$$C = GR - EP \quad (2.3)$$

#### 2.5 Monitoramento da umidade do solo e determinação do armazenamento de água no solo

Os dados de umidade do solo ( $\theta$ ) foram coletados entre os meses de março e setembro do ano hidrológico 2022/2023, que é o período de estiagem para a região de estudo. O intervalo foi de 2 dias, considerando os dias úteis da semana. Para a medição da umidade foi usado o sensor TRIME-PICO da IMKO GmbH que é um dispositivo de medição portátil e determinação não destrutiva da umidade volumétrica do solo até a profundidade de 1,80m. O sensor foi usado em combinação com o módulo Bluetooth PICO-BT (Figura 2.3a).

Figura 2.3 – Sensor TRIME-PICO da IMKO GmbH combinado com o módulo Bluetooth PICO-BT (a) e o sensor inserido no tubo TECNAT PC (b)



Fonte: Do autor (2024)

O sensor foi inserido nos tubos de acesso TECNAT PC com 44mm de diâmetro e 1,80 m de comprimento, em 7 pontos no interior da FESM (Figura 2.3b), de forma gradual medindo a umidade nas profundidades (20; 40; 60; 100; 140 e 180 cm). A profundidade de monitoramento cobre a maior parte da zona radicular efetiva para absorção de água, uma vez que se verifica, para o caso de uma FESM, a existência de raízes finas majoritariamente até 180 cm de profundidade do perfil do solo.

Com base nos dados de umidade obtidos, o armazenamento de água no solo (SWS) e a variação de armazenamento de água integrada à profundidade das raízes (180 cm) em intervalo de tempo (2 dias) ( $\Delta W$ ) foram obtidos com base nas seguintes equações:

$$SWS = \sum_{i=n}^n \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2} * h \quad (2.4)$$

$$\Delta W = SWS_{(Final)} + SWS_{(Initial)} \quad (2.5)$$

Onde  $i$  é a profundidade de monitoramento da umidade do solo,  $n$  é o número de profundidades (20; 40; 60; 100; 140 e 180 cm),  $\theta$  é a umidade do solo ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ),  $h$  é a

espessura da camada entre  $i$  e  $i+1$  (mm),  $SWS_{(Final)}$  é o armazenamento medida no tempo atual e  $SWS_{(Inicial)}$  é o armazenamento medida anteriormente.

## 2.6 Estabilidade temporal da umidade do solo

Para verificar a variação dos dados de umidade ao longo do período de monitoramento, avaliou-se, respectivamente, a variabilidade temporal e espacial da umidade no perfil do solo em cada ponto de interesse. Nesse caso, foi usado o coeficiente de variação (CV) da umidade ao longo do tempo (CVt) e do espaço (CVs). Neste processo, utilizou-se o conjunto de dados obtidos nos 7 pontos de monitoramento de umidade do solo durante o período de estudo.

Em seguida, fez-se a avaliação da estabilidade temporal do armazenamento da água no solo, para entender a sua dinâmica em função das espécies representativas da Mata Atlântica, por meio do Índice de Estabilidade Temporal (TSI), uma função da Diferença Relativa Média ( $MDR_j$ ) e do desvio padrão da diferença relativa ( $\sigma DR_{ij}$ ).

A DR, que é uma técnica proposta por Gao *et al.* (2015), permite verificar a estabilidade relacionada ao tempo do comportamento espacial dos processos e assim a identificar pontos mais estáveis, isto é, com uma persistência temporal dos padrões de armazenamento da água no perfil do solo, para o monitoramento contínuo com boa precisão e reduzindo esforço amostral, além de ser possível, no presente caso, de se associar a estabilidade com a espécie representativa da FESM. A DR foi obtido através da diferença entre os valores do armazenamento observado individualmente no tempo  $i$  e no local  $j$  ( $SWS_{ij}$ ) e a média do armazenamento da água no solo na mesma data, considerando todos os 7 pontos ( $SWS_i$ ), pela mesma média (equação 2.6).

$$DR_{ij} = \frac{SWS_{ij} - \overline{SWS}_i}{\overline{SWS}_i} \quad (2.6)$$

$$\overline{SWS}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m SWS_{ij} \quad (2.7)$$

$$\overline{DR}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DR_{ij} \quad (2.8)$$

$$\sigma DR_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (DR_{ij} - \overline{DR}_j)^2} \quad (2.9)$$

Onde:  $n$  é o número de pontos monitorados e  $m$  é o número de dias. Valores próximos de zero da diferença relativa média indicam maior estabilidade temporal do processo e menor desvio padrão representa menor variabilidade ou dispersão do armazenamento da água no solo.

O  $TSI_{ij}$  foi calculado seguindo a metodologia usada por Junqueira Júnior *et al.*, (2017). O  $TSI_{ij}$  é o indicador de estabilidade temporal na posição  $j$  e foi obtido por meio da seguinte equação:

$$TSI = \sqrt{(\overline{DR}_j)^2 + (\sigma DR_j)^2} \quad (2.10)$$

Os valores menores de TSI indicam menores erros associados à estabilidade temporal e dispersão do armazenamento da água no solo e, conseqüentemente, maior confiabilidade dos valores obtidos no ponto escolhido.

## 2.7 Determinação do Balanço hídrico

A determinação do balanço hídrico foi conduzida conforme Jones *et al.* (2017), para cada espécie monitorada durante o período seco. A equação usada para o cálculo é a seguinte:

$$\frac{Dr}{\Delta t} = \frac{EP - ET - \Delta W}{\Delta t} \quad (2.11)$$

Em que  $Dr$  é o fluxo de água abaixo da zona radicular (percolação) (mm),  $ET$  é a evapotranspiração real (mm) e  $\Delta t$  é o intervalo de variação. Tendo em conta que no período seco a  $ET$  excede a precipitação, o  $Dr$  é negativo, i.e., a água move-se para cima em direção da zona radicular, ou seja, não há percolação profunda (Jones *et al.*, 2017). Neste caso assume-se que toda a água de chuva para o período seco, só recarrega até a zona radicular das plantas (Mello *et al.*, 2019), que para este estudo é de 180 cm, e sai para atmosfera através da evapotranspiração. Assim, a equação foi reescrita, calculando a evapotranspiração por meio de balanço hídrico ( $ET_{WB}$ ), negligenciando o  $Dr$ , passando a ser assim:

$$\frac{ET_{(WB)}}{\Delta t} = \frac{EP - \Delta W + C}{\Delta t} \quad (2.12)$$

Os procedimentos do cálculo das variáveis EP,  $\Delta W$  e C foram descritos anteriormente.

## 2.8 Quantificação da biomassa radicular no perfil do solo

Para quantificação da biomassa radicular (BR) foi utilizado o método de amostragem por monólitos descrito por Ratuchne *et al.* (2016). Esse método é o mais indicado em áreas onde não há informações sobre a biomassa florestal (florestas naturais) e consiste na amostragem em blocos de solo (monólitos) e é recomendado para florestas nativas, fornecendo dados do ecossistema de forma geral, e não apenas para árvores individualizadas (Ratuchne *et al.*, 2016).

Nesse método, fez-se a escavação de 3 monólitos em locais distintos no interior da floresta que são próximos aos pontos de monitoramento das demais variáveis (Figura 2.4). Os monólitos extraídos tinham dimensões de 25 cm x 25 cm x 180 cm, divididos em 6 sub-perfis geométricos (camadas) cuja dimensões foram: 0 – 20 cm; 20 – 40 cm; 40 – 60 cm; 60 – 100 cm; 100 – 140 cm e 140 – 180 cm, (Figura 2.4).

Figura 2.4 – Amostragem de raízes por monólitos no interior do remanescente.



Fonte: Do autor (2024)

Inicialmente, foram abertas trincheiras de 180 cm para permitir o acesso ao perfil do solo com uma vista lateral do monólito a ser retirado. Em seguida foi removido o excesso da serapilheira da parte superior (superfície do solo). Na sequência eliminou-se as irregularidades no perfil, deixando-o perfeitamente aprumado. Delimitou-se a área com auxílio de uma régua métrica e, com a utilização de ferramentas como pá e espátula, coletou-se cada sub-perfil de acordo com as dimensões pré-estabelecidas.

O solo junto com as raízes coletadas foi armazenado em baldes devidamente identificados e transportado para o laboratório para o processo de separação das raízes. No laboratório, a primeira atividade foi a determinação da massa total de solos de cada monólito, em seguida realizou-se a separação das raízes. Para tanto, inicialmente o solo foi depositado numa bandeja e fez-se a catação manual, retirando as raízes mais destacáveis.

Na sequência, o solo foi submerso em água para separação das raízes restantes e menos destacáveis, usando-se um conjunto de 3 peneiras sobrepostas, sendo a superior com malha de 5 mm, a do meio com 3 mm e a inferior com 1 mm, para reter as raízes (Ramos *et al.*, 2018; Ratuchne *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2024b). O solo mergulhado foi depositado na peneira de 5 mm e recebeu sucessivos jatos de água, onde só permaneciam raízes nas peneiras.

Após isso, fez-se o enxugamento da água resultante da lavagem das raízes usando papel toalha e a remoção de pequenos resíduos como sementes, pequenos torrões e folhas.

Na triagem das raízes foram consideradas três categorias de diâmetro seguindo a sugestão de Ratuchne *et al.* (2016) sendo raízes finas (<2 mm), intermediárias finas (2 – 5 mm), intermediárias grossas (5 – 50 mm) e as grossas (>50 mm) (Figura 2.5). Foi necessário o uso de paquímetro para a medição de diâmetro das raízes, as quais foram posteriormente pesadas.

Figura 2.5 – Categorias de diâmetro de raízes, sendo raízes finas (<2 mm), intermediárias finas (2 – 5 mm), intermediárias grossas (5 – 50 mm) e as grossas (>50 mm) obtidas em cada camada amostrada



Fonte: Do autor (2024)

## 2.9 Estimativa da biomassa acima da superfície

Para estimativa da biomassa acima da superfície (AGB) foi utilizado o modelo pantropical, que segundo Chave *et al.*, (2014) tem o melhor desempenho em todos os tipos de floresta e condições bioclimáticas. Para o modelo, são necessárias medições do tamanho de uma árvore individual como preditores de sua massa (Ploton *et al.*, 2016). Por tanto, foram feitas as medições do diâmetro à altura do peito  $D$  (cm) e a altura total da árvore  $H$  (m), usados para capturar variações de volume entre as árvores. O modelo é assim escrito:

$$AGB_{est} = 0.0673 * (\rho D^2 H)^{0.976} \quad (2.13)$$

Em que  $\rho$  ( $\text{g cm}^{-3}$ ) é a densidade da madeira para converter volume em massa seca.

## 2.10 Caracterização dos atributos físicos do solo

A caracterização dos atributos físicos do solo consistiu na determinação da condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), densidade do solo ( $D_s$ ), densidade das partículas ( $D_p$ ) e porosidade total (PT), seguindo as orientações da Embrapa (2017). As amostras do solo foram coletadas nos mesmos locais de amostragem das raízes, considerando as mesmas camadas das etapas anteriores, i.e., 0 – 20 cm; 20 – 40 cm; 40 – 60 cm; 60 – 100 cm; 100 –

140 cm e 140 – 180 cm. Foram colhidas amostras indeformadas com auxílio de amostrador do tipo *hulland* e cilindros metálicos com um volume padronizado de 22,65 cm<sup>3</sup>. As amostras foram identificadas e levadas ao laboratório do Departamento de Recursos Hídricos (DRH) onde todas as análises foram realizadas.

## 2.11 Análise de dados

Para comparar a distribuição das raízes nas camadas do perfil do solo em função das suas categorias, realizou-se uma análise de variância e o teste de *Tukey* para a comparação de médias, considerando uma probabilidade de erro de 5%, utilizando o pacote estatístico *Sisvar*, versão 5.8. Utilizou-se o Delineamento de Blocos Completos Casualizados (DBCC) no arranjo experimental de parcelas subdivididos, onde a camada foi considerada como fator principal (parcela) e as categorias de raízes como subfator (subparcela).

Para avaliar a relação entre a umidade do solo e a biomassa radicular (BR) no perfil do solo, foi feita análise de correlação com base em seus valores médios, considerando os pontos próximos de amostragem da BR e de monitoramento de umidade do solo. Neste caso foi utilizado o coeficiente de Pearson o qual é uma medida de quão fortemente duas variáveis estão relacionadas linearmente. O valor do coeficiente varia de -1 a 1, onde -1 indica uma correlação negativa perfeita, 0 indica nenhuma correlação e 1 indica uma correlação positiva perfeita (Torres *et al.*, 2020).

Segundo Torres *et al.* (2020), os intervalos de correlação podem ser interpretados da seguinte forma: intervalo de 0,9 a 1,0 (-0,9 a -1,0) indica correlação positiva (negativa) muito alta; de 0,7 a 0,9 (-0,7 a -0,9) representa correlação positiva (negativa) alta; de 0,5 a 0,7 (-0,5 a -0,7) sugere correlação positiva (negativa) moderada; de 0,3 a 0,5 (-0,3 a -0,5) indica correlação positiva (negativa) fraca; de 0,0 a 0,3 (0,0 a -0,3) representa correlação positiva (negativa) muito fraca.

Para o balanço hídrico, primeiramente foi feito o cálculo da quantidade da água perdida por evapotranspiração por cada espécie avaliada. Em seguida, foram utilizadas rotinas interpretadas na linguagem R, por meio de pacote *ggplot2* para a criação de gráficos que facilitaram a interpretação dos resultados. Por último, usando o programa R e os pacotes *ggplot2* e *sf*, foram criados mapas de cores para a representar os valores totais de cada variável por ponto.

Uma análise de redundância (RDA) foi utilizada para explicar a variabilidade da umidade no perfil do solo, em função das variáveis: BR, Ksat, Dp e PT. Foram utilizadas

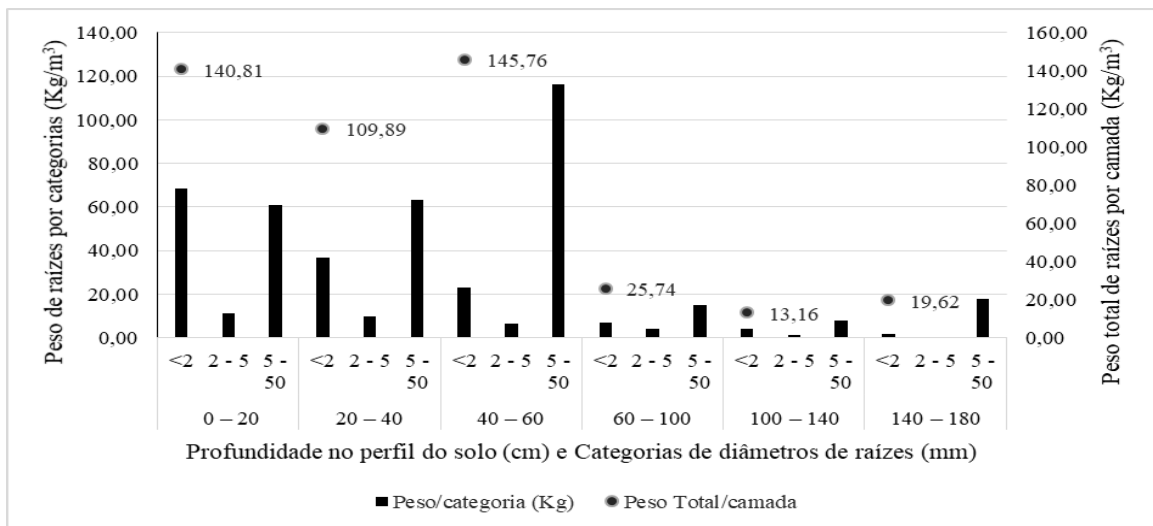
rotinas interpretadas na linguagem R, por meio do pacote *Factoextra*. Fez-se o uso de “corroplot” para análise de correlação entre as variáveis estudadas. O RDA é uma técnica multivariada que permite discriminar como um determinado conjunto de variáveis é explicado pelos demais por meio de análises de diversas regressões lineares (Junqueira Júnior *et al.*, 2017).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Distribuição da biomassa radicular das espécies da FESM

A Figura 3.1 ilustra o comportamento da distribuição das raízes por categoria de diâmetro em cada camada considerada no estudo. Foram consideradas as médias dos 3 perfis coletados no interior da FESM entre os meses de julho e agosto de 2023.

Figura 3.1 – Massa das raízes (kg/m<sup>3</sup>) em cada categoria de diâmetro (mm) e massa total das raízes (kg/m<sup>3</sup>) em cada profundidade do solo em um remanescente da Floresta Estacional Semidecidual Montana.



Fonte: Do autor (2024)

Com base nos resultados da análise de variância observou-se que não há interação entre as camadas de amostragem de raízes e as categorias de diâmetros avaliadas ( $p > 0,05$ ). Isso significa que a concentração de raízes por categoria não depende da camada no perfil do solo. A mesma análise mostrou que houve significância ( $P < 0,05$ ) nas categorias de diâmetros, e o teste de comparação de médias (*Tukey*) revelou diferença estatística entre as médias dessas categorias. Essa diferença pode indicar variações significativas na concentração de raízes em diferentes diâmetros.

No gráfico anterior (Figura 3.1), observa-se uma clara distribuição vertical da biomassa radicular, com maior concentração na superfície do solo (20 - 60cm) e subsequente diminuição com aumento da profundidade do solo. A maior biomassa radicular, concentrou-se nas camadas 0-20 cm; 20-40 cm e 40-60 cm, com pesos superiores a 100 kg m<sup>-3</sup>. Nas camadas

60-100, 100-140 e 140-180 cm, as massas de raízes foram menores, com valores inferiores a  $20 \text{ kg m}^{-3}$ . Um comportamento similar da distribuição da biomassa radicular foi observado por Luo *et al.* (2019) nas florestas decíduas e coníferas no noroeste de Pequim, na China, caracterizado por clima de monções.

Fazendo-se uma distribuição das raízes em categoria dos diâmetros (Ratuchne *et al.*, 2016), as maiores massas de raízes foram encontradas na categoria de raízes intermediárias grossas (5 – 50 mm) em todas as camadas, exceto de 0-20 cm, onde destacou-se a categoria das raízes finas (< 2 mm). A categoria das raízes intermediárias finas (2 – 5 mm), apresentou valores inferiores em todas as camadas.

Com base nos resultados, percebe-se que a concentração das raízes no solo está relacionada às funções de cada categoria de diâmetro ao longo do perfil do solo, ou seja, nas diferentes profundidades do solo.

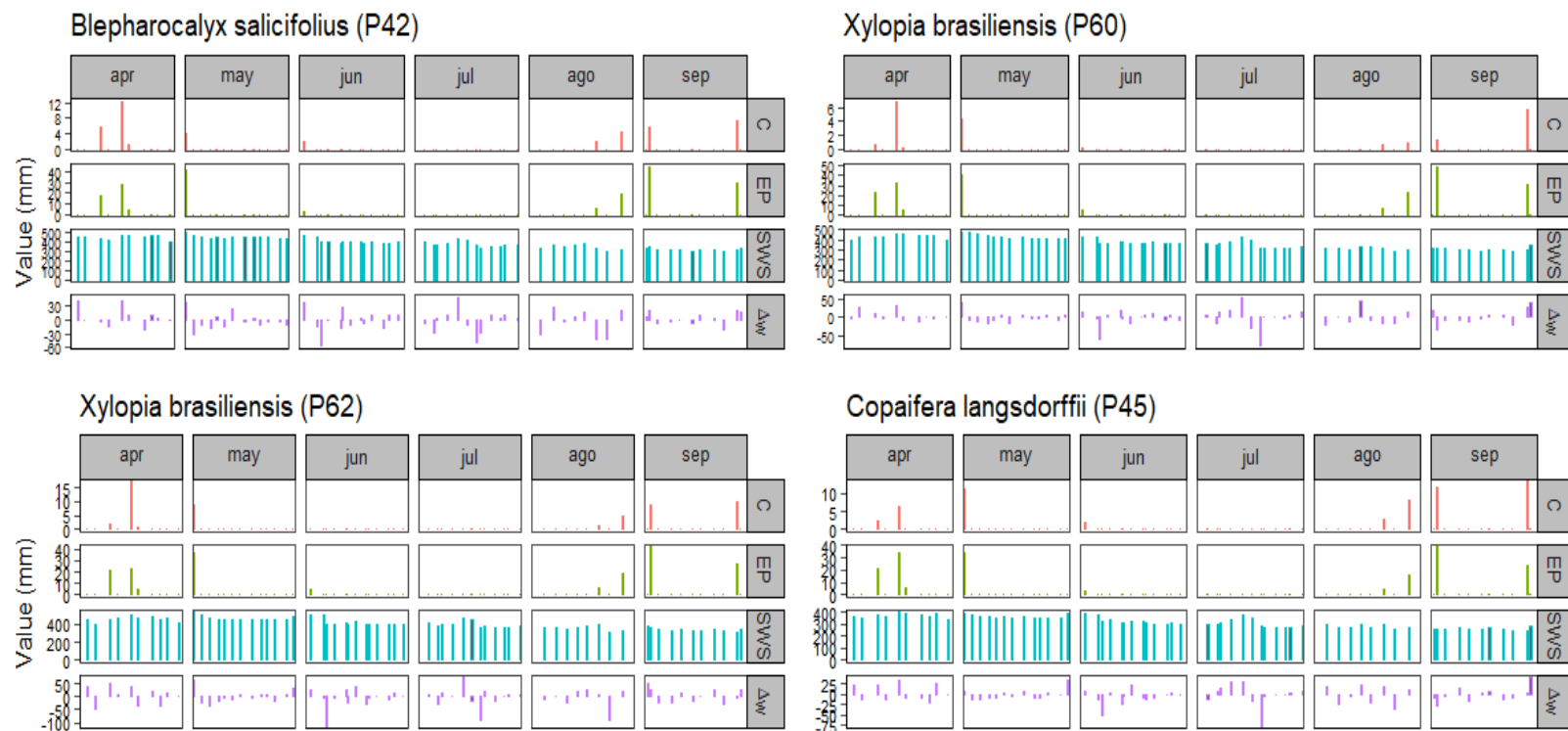
As raízes mais finas (< 2 mm) são responsáveis pela absorção de água e ciclagem de carbono e nutrientes provenientes da decomposição da serrapilheira (Basílio *et al.*, 2024; Leonova *et al.*, 2022; Ratuchne *et al.*, 2016), e essas raízes geralmente concentram-se nas camadas mais superficiais do solo (Kulmann *et al.*, 2022) e podem se estender até 10 m de profundidade, dependendo das características do clima, solo e fatores genéticos das espécies (Christina *et al.*, 2017). Por outro lado, as raízes mais grossas são responsáveis pelo suporte e fixação da planta ao solo, condução de solutos, estabilidade e expansão do sistema, e elas ocorrem em concentrações menores nas camadas mais profundas (Morais *et al.*, 2017; Ratuchne *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2024b). As raízes grossas têm uma menor contribuição na ciclagem de nutrientes e absorção de água em comparação com as raízes finas (King *et al.*, 2021).

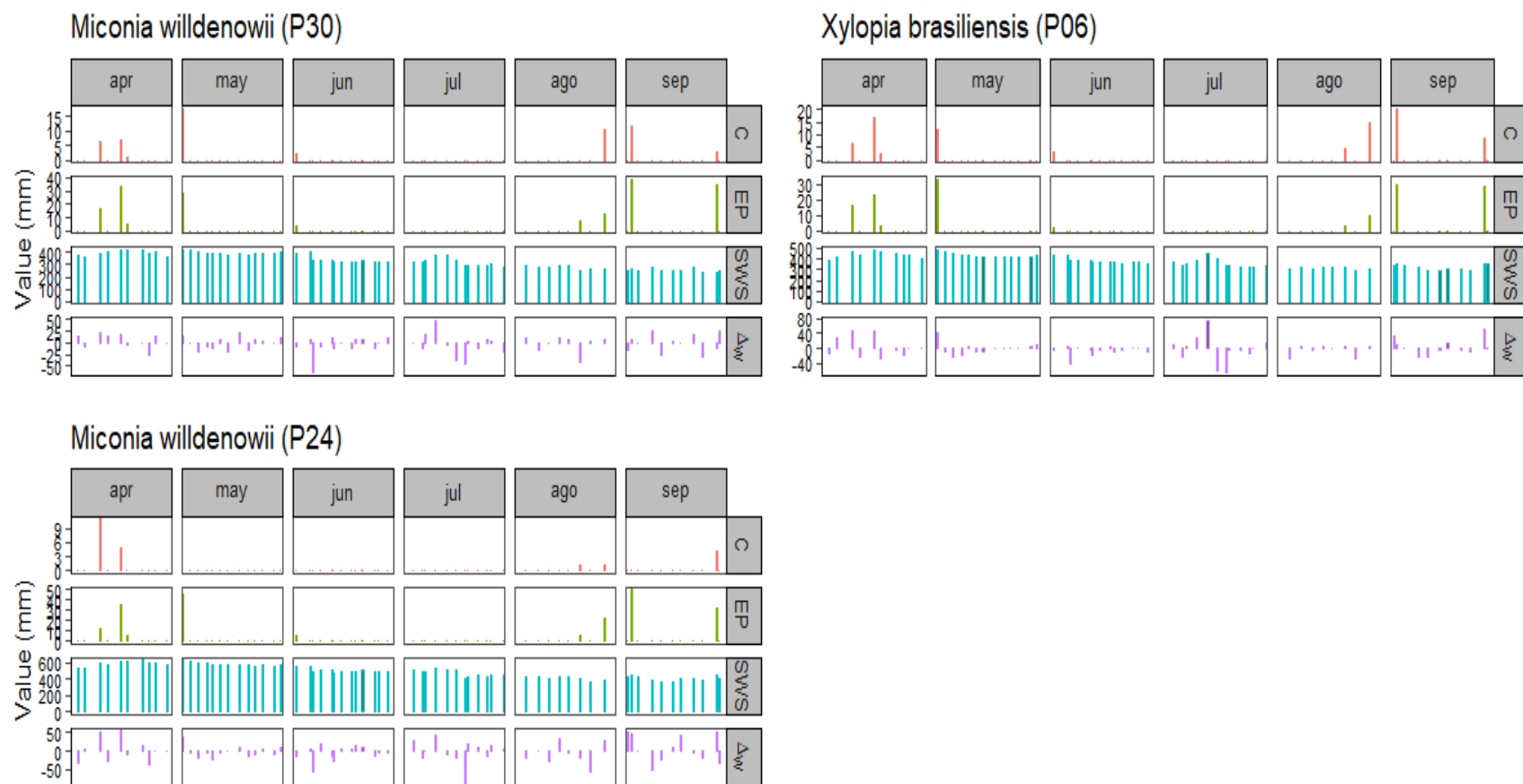
Estudos anteriores em diferentes ecossistemas foram encontrados resultados variados, mas muitos desses estudos focaram nas raízes mais finas, que são representativas em ecossistemas florestais. Por exemplo, Lima *et al.* (2011) encontraram uma média de  $591 \text{ g m}^{-2}$ , o equivalente a  $2,96 \text{ kg m}^{-3}$  de biomassa radicular fina em fragmentos florestais durante o período seco considerando uma profundidade de 20 cm. Por sua vez, Ribeiro *et al.* (2024a) encontraram resultados próximos de  $141 \text{ g m}^{-2}$ , o equivalente a  $0,71 \text{ kg m}^{-3}$  na região da floresta Amazônia, considerando uma profundidade de 20 cm. Portanto, os resultados do presente estudo indicam que o remanescente da FESM concentra biomassa radicular principalmente nas raízes mais finas nas camadas superficiais.

### 3.2 Balanço hídrico individualizado por árvore

As séries ilustradas na Figura 3.2, segmentadas por meses, mostram a dinâmica temporal de cada elemento do balanço hídrico (EP, SWS e C) e da  $\Delta W$  para o período de avaliação (abril a setembro de 2023) em cada ponto, considerando as espécies arbóreas no remanescente da FESM.

Figura 3.2 – Séries temporais mensais dos elementos do balanço hídrico: precipitação efetiva (EP), armazenamento da água no solo (SWS), interceptação do dossel (C), e variação do armazenamento da água no solo ( $\Delta W$ ) em cada espécie da FESM, durante o período de abril a setembro de 2023.





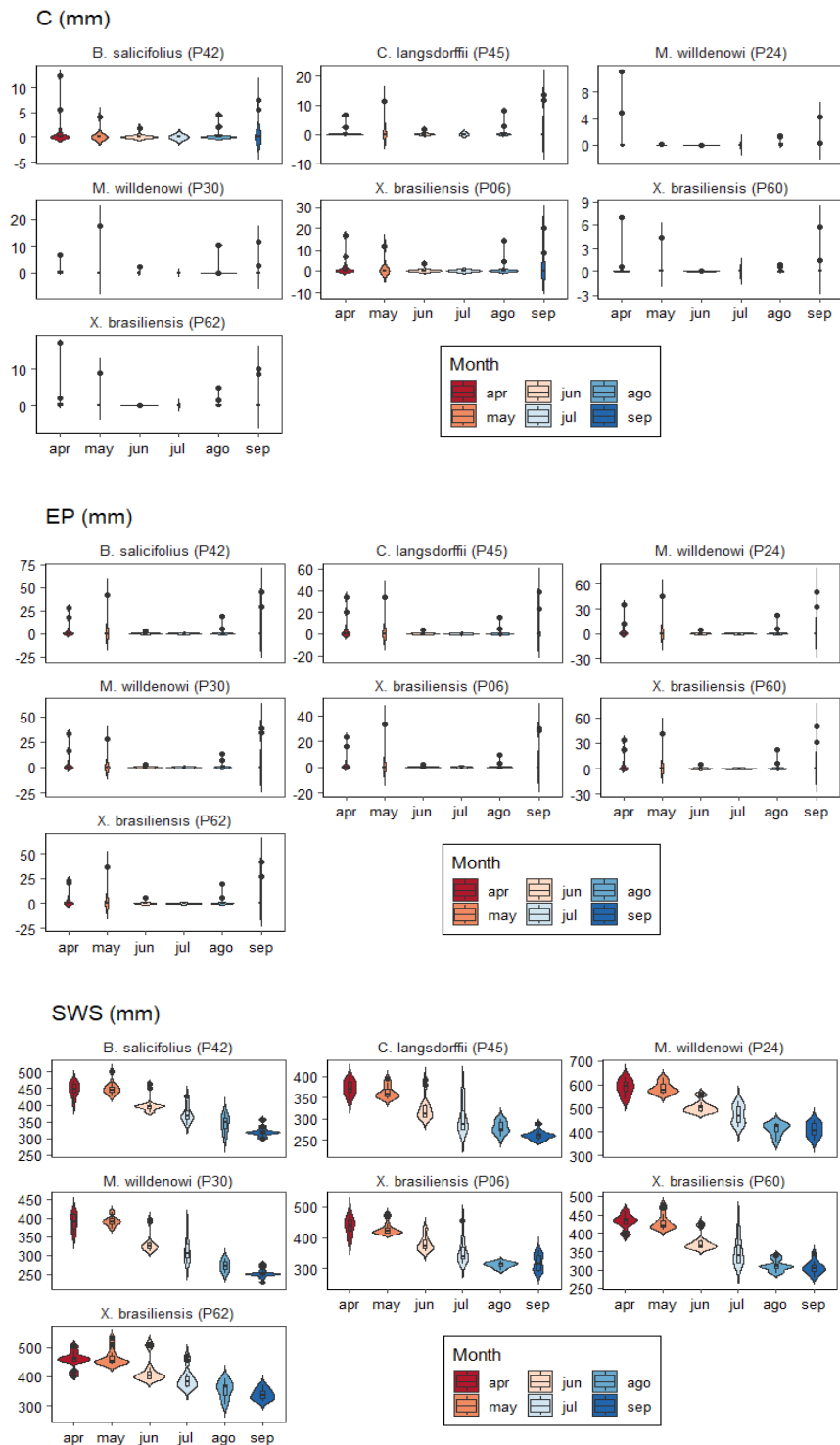
Fonte: Do autor (2024)

Durante o período de avaliação, a precipitação bruta (GR) observada foi de 250,7mm, com os maiores valores registrados em abril, agosto e setembro, variando de 23,1 mm a 45,3 mm, 7,5 mm a 23,9 mm e 36,9 mm a 50,5 mm, respectivamente, em todos os pontos de monitoramento. A quantidade de chuva transformada em EP média acumulada foi de aproximadamente 188,2 mm, ao longo do período de avaliação, fruto de 10 eventos de chuva. Este valor médio da EP é próximo ao observado por Junqueira Júnior *et al.*, (2019) no mesmo remanescente durante o período seco dos anos hidrológicos 2012/13 e 2013/14, que foram de 183 mm e 189 mm, respectivamente.

A C, que acompanhou a variabilidade temporal da EP, teve uma média de aproximadamente 50 mm considerando as 7 árvores monitoradas, correspondendo a cerca 22%, com uma intensificação em meados do período seco. A média da C esteve acima da encontrada por Junqueira Júnior *et al.* (2019) no período seco, possivelmente devido à baixa intensidade da chuva e ao menor número de eventos de precipitação observados no período de análise (Ghimire *et al.*, 2017).

Os meses de maior GR (abril, agosto e setembro), produziram, os maiores valores de EP e C (Figura 3.2), e os valores apresentaram maior variabilidade, conforme mostrado nos gráficos de violinos na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Elementos do balanço hídrico (EP, SWS e C) em cada ponto com a espécie representante durante o período de estudo (período seco) na FESM.



Fonte: Do autor (2024)

A EP variou de 3,2 a 45,1 mm em abril, de 5,4 a 23,0 mm em agosto e de 23,5 a 50,2 mm em setembro, considerando todos os pontos de monitoramento. A C, cujas séries seguem

o comportamento da EP (Figura 3.2), atingiu até 17,6 mm em abril, 14,4 mm em agosto e 20,3 mm em setembro para algumas árvores avaliadas.

Os meses críticos em termos de EP foram maio, junho e julho, com menor GP e baixa variabilidade dos valores (Figura 3.3). No mês de junho, foi observada uma média de 4,08 mm de EP e uma média de 1,3 mm de C. Esse comportamento da EP e C ao longo do período está relacionado à variabilidade intra-anual da precipitação, considerando que maio, junho, julho e agosto são meses críticos para precipitação na região de estudo, conforme relatado por e Guauque-Mellado *et al.* (2022); Junqueira Júnior *et al.* (2017); De Oliveira *et al.* (2021).

Analisando por espécie, a *X. brasiliensis* apresentou maiores valores de EP no ponto 60 (5,3 a 49,2 mm) e menores valores de C, com o máximo observado de 6,9 mm. No ponto 62, os valores de EP variaram de 5,3 mm a 42,0 mm, e o valor máximo de C foi de 17,2 mm. No ponto 6, os valores de EP foram sempre menores em comparação com outras espécies avaliadas, variando de 2,2 mm a 30,2 mm, enquanto a C foi maior, com um valor máximo de 20,3 mm.

Por outro lado, *M. willdenowii* apresentou valores maiores de EP (de 5,3 mm a 50,2 mm), superando todas as árvores avaliadas em aproximadamente 50 mm, com um valor máximo de C de 11,1 mm. No ponto 30 com a mesma espécie, os valores de EP variaram de 3,3 mm a 38,8 mm, com uma C máxima de 17,6 mm. As demais árvores, *B. salicifolius* e *C. langsdorffii*, apresentaram valores de EP variando de 3,5 mm a 44,9 mm e 3,6 mm a 38,6 mm, respectivamente, com valores máximos de C sendo de 12,4 mm e 13,4 mm.

Os resultados indicam que as espécies apresentam um comportamento irregular em relação a EP e C, provavelmente influenciado pela arquitetura das copas e pelas características específicas da floresta em cada ponto (Lian *et al.*, 2022; Mello *et al.*, 2024; Oliveira *et al.*, 2024). Em alguns pontos, especialmente onde há presença de *B. salicifolius* e *X. brasiliensis*, observou-se a sobreposição de outras espécies às árvores monitoradas.

O SWS em todos os pontos de monitoramento mostrou valores mais elevados no início da série (abril), com uma tendência geral de declínio ao longo do período de avaliação, apresentando oscilações devido aos eventos de chuva (Figura 3.2). Eventos de chuva com EP  $\geq 4$  mm foram significativos para uma resposta mais expressiva da umidade do solo, influenciando positivamente o SWS. Uma resposta de umidade do solo à precipitação na faixa de 3,5 a 5,6 mm também foi observada por Liu *et al.* (2020), em uma floresta tropical nativa.

Nos gráficos de violinos ilustrados na Figura 3.3, observa-se que a concentração dos valores do SWS para abril e maio situou-se em intervalos semelhantes na maioria dos pontos monitorados. O mês de julho apresentou a maior variabilidade dos valores de SWS

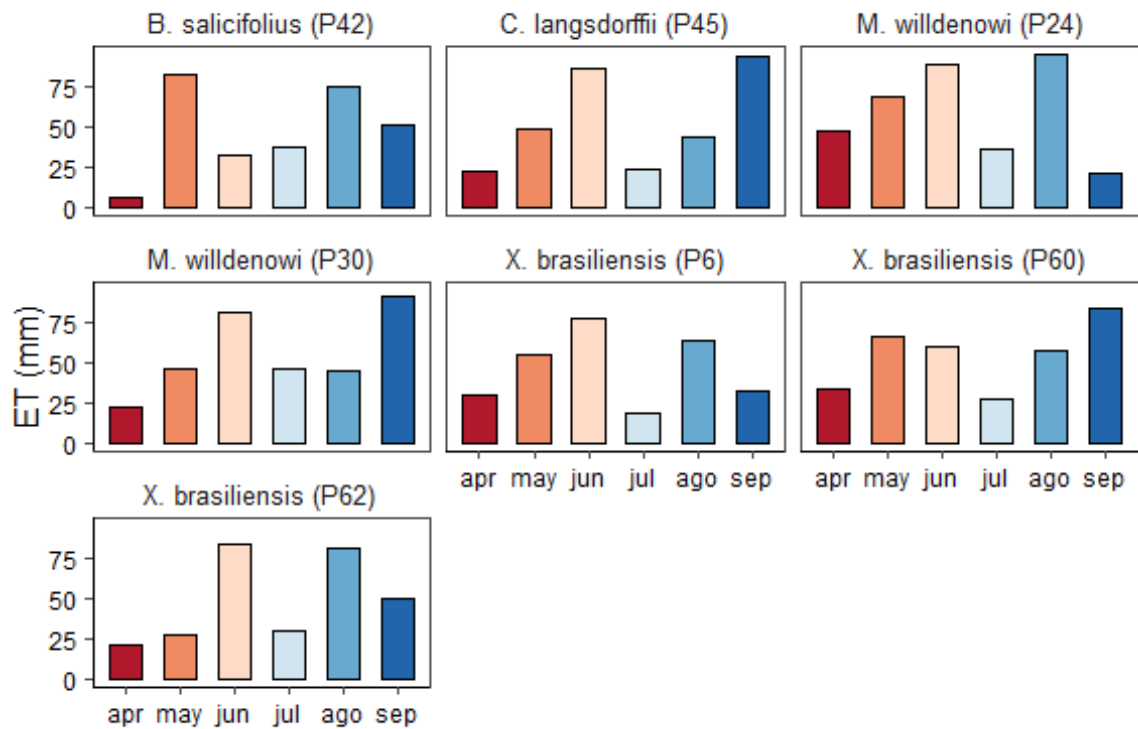
principalmente nos pontos 45, 30, 6 e 60, embora não tenha sido observada EP na FESM. Rodrigues *et al.* (2021b) fazendo uma análise exploratória de dados de SWS, no mesmo remanescente, constatou a presença de valores discrepantes em junho, julho e agosto de 2015, o que provavelmente explica a variação de SWS no mês de julho para o presente estudo. A variação do SWS também foi observada em abril nos pontos 30 e 6, representados por *M. willdenowii* e *X. brasiliensis* e em junho nos pontos 45 e 62, representados por *C. langsdorffii* e *X. brasiliensis*, respectivamente.

Ao analisar o SWS por ponto de monitoramento e a árvore monitorada, o maior destaque foi no ponto 24 com a *M. willdenowii*, onde os valores foram consistentemente mais altos ao longo do período de avaliação, variando de 359,0 mm a 631,0 mm. O ponto 42, com *B. salicifolius* apresentou o segundo maior destaque no SWS, com valores variando de 300 a 501,4 mm. Os menores valores foram observados nos pontos 45 e 30, representados por *C. langsdorffii* e *M. willdenowii*, com variações de 246,7 mm a 398,5 mm e 228,2 mm a 416,0 mm, respectivamente. Nos demais pontos, o SWS variou de 279,7 mm a 476,5 mm, de 304,1 mm a 513,2 mm e de 288,2 mm a 483,2 mm nos respectivos pontos 60, 62 e 6, ambos representados por *X. brasiliensis*.

A variação do SWS entre os pontos de monitoramento na área do remanescente florestal pode estar relacionada às diferenças na orientação topográfica, propriedades do solo, densidade de plantas em cada ponto (Junqueira Júnior *et al.*, 2017, Rodrigues *et al.*, 2020) e distribuição das chuvas (Rodrigues *et al.*, 2020).

O comportamento da evapotranspiração (ET) nas espécies da FESM apresentou variações entre as espécies, conforme ilustrado pelos gráficos da variação mensal (Figura 3.4).

Figura 3.4 – Comportamento da ET em cada espécie avaliada no interior da FESM.



Fonte: Do autor (2024)

A ET foi mais alta para a maioria das árvores no mês de junho, variando de 28,0 mm a 82,4 mm. No entanto, esses valores não superaram os observados em setembro para *M. willdenowii*, *C. langsdorffii* e *X. brasiliensis* (P30, P45 e P60, respectivamente) e em agosto para *M. willdenowii* e *X. brasiliensis* (P24 e P62, respectivamente), com valores superiores a 75 mm.

Os meses de abril e julho foram os mais críticos em termos de ET para quase todas as espécies avaliadas, com valores variando de 6,5 mm a 47,5 mm em abril, e de 19,2 mm a 45,8 mm em julho. O mesmo cenário foi observado em setembro em algumas árvores, com valores abaixo de 50 mm.

A variabilidade temporal da ET por árvore pode estar associada às condições meteorológicas variáveis dentro do ecossistema, à dinâmica do SWS (Wei *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2020) e aos padrões de precipitação efetiva em cada ponto de monitoramento. Abril e setembro são os meses em que foram observados maiores valores de EP, o que provavelmente influenciou nos valores baixos de ET. Um dos fatores, é que, no período de transição da estação seca para chuvosa, quando o ecossistema está em recuperação, os valores de GR tendem a ser maiores e os valores de ET menores (Deng *et al.*, 202), o que pode explicar os baixos valores de ET em algumas árvores no mês de setembro. Por outro lado, as condições

de maior umidade podem ter contribuído para a redução da ET em abril, uma vez que este mês representa transição para o período seco, e apresenta maiores armazenamentos de água na área (Silva *et al.*, 2017; Souza *et al.* 2016). É importante destacar que a ausência de EP no mês de julho provavelmente foi determinante para os menores valores de ET registrados no mesmo mês.

Em relação às condições meteorológicas, a disponibilidade de energia ( $R_n$ ) e o fenômeno El-Niño (INPE 2024) podem ter impulsionado a evapotranspiração no remanescente da FESM durante agosto e setembro.

Além das condições meteorológicas, a morfologia das plantas e a regulação estomática desempenham papéis cruciais na variabilidade da ET por espécies (Wei *et al.*, 2017). A estrutura do povoamento florestal e do dossel também afetam essa variabilidade (Kozill *et al.*, 2020; Tan *et al.*, 2019). Na Figura 3.4 observa-se que os maiores valores de ET foram registrados na *M. willdenowii* (P24 e P30) e *C. langsdorffii* (P45), com valores de 94,5 mm em agosto, 91,2 mm em setembro e 93,5 mm em setembro, respectivamente. Os valores mínimos mensais observados para essas espécies variaram de 21,5 mm a 22,5 mm. Essas espécies se destacam por apresentar uma copa densa (Costa *et al.*, 2010; Goldenberg *et al.* 2020), localizada em pontos com menor densidade de plantas no remanescente, e com condições distintas de SWS.

Por outro lado, *X. brasiliensis*, com uma copa cônica, apresentou valores máximos de ET de 83,8 mm em setembro no ponto 60, e 83,1 mm e 77,4 mm nos pontos 62 e 6 em junho, respectivamente. Os valores mínimos foram de 27,6 mm em junho no ponto 60, 21,14 mm em junho no ponto 62 e 19,2 mm em abril no ponto 6. A *B. salicifolius*, localizada em áreas com maior densidade de árvores, apresentou o menor valor mensal de ET, que foi de 6,5 mm em abril (início do período de avaliação), embora tenha alcançado o máximo de 82,4 mm durante todo período de avaliação.

### 3.3 Relação entre o estoque de biomassa acima do solo, evapotranspiração e interceptação da chuva pelo dossel

Os dados apresentados na Tabela 3.1 referem-se ao estoque de biomassa acima do solo (AGB), acumulados de interceptação do dossel (C) e a evapotranspiração (ET) em cada espécie monitorada durante o período de estudo.

Tabela 3.1 – Valores de AGB e cumulativos da C e ET por espécie.

Ponto	Espécie	AGB (kg)	C (mm)	ET (mm)
P42	<i>Blepharocalyx salicifolius</i> (Kunth)	14,31	44,98	284,27
P60	<i>Xylopia brasiliensis</i> (Spreng.)	14,03	20,64	328,88
P62	<i>Xylopia brasiliensis</i> (Spreng.)	15,52	54,18	293,42
P45	<i>Copaifera langsdorffii</i> (Desf.)	48,96	58,84	316,04
P30	<i>Miconia willdenowii</i> (Klotzsch ex Naudin)	20,41	58,84	331,43
P06	<i>Xylopia brasiliensis</i> (Spreng.)	54,52	88,35	278,96
P24	<i>Miconia willdenowii</i> (Klotzsch ex Naudin)	24,35	23,43	357,29

Fonte: Do autor (2024)

Na tabela 3.1, observa-se que a espécie *X. brasiliensis* apresentou o maior estoque de AGB, com 54,5 kg no ponto 6, superando as demais árvores. No entanto, a mesma espécie apresentou valores menores nos pontos 60 e 62, com 14,0 e 15,5 kg de AGB, respectivamente. Apesar de *X. brasiliensis* ter um formato cônico no seu crescimento, a árvore no ponto 6 mostrou um crescimento equilibrado, com uma expansão da copa e um DAP maior. Em contraste, as árvores nos pontos 60 e 62 apresentam crescimento apical, influenciadas pela presença de outras árvores ao redor, resultando em um DAP menor.

O mesmo padrão de crescimento foi observado na árvore do ponto 42 (*B. salicifolius*), que também apresentou um estoque de AGB menor, de 14,3 kg. A *C. langsdorffii* no ponto 45 apresentou um estoque de AGB de 49,0 kg, modestamente maior. Por sua vez, a *M. willdenowii* nos pontos 30 e 24 apresentou estoques de AGB modestamente menores, com 20,4 e 24,4 kg, respectivamente, e ambas as espécies mostraram um crescimento equilibrado.

O crescimento vegetativo das plantas é um fator chave para influenciar as características da planta que estão relacionadas ao AGB, neste caso DAP e altura. Para o presente trabalho, observa-se que a característica da árvore que está relacionada ao maior AGB é o DAP em relação à altura, isto é, quanto maior for o DAP maior será o AGB. Essa

constatação está de acordo com Liang *et al.*, (2018), que encontram que as estimativas do AGB foram mais significativamente influenciadas pelo DAP do que pela altura da árvore. Wang *et al.*, (2019) também observaram uma forte correlação entre a precisão das estimativas de AGB e DAP.

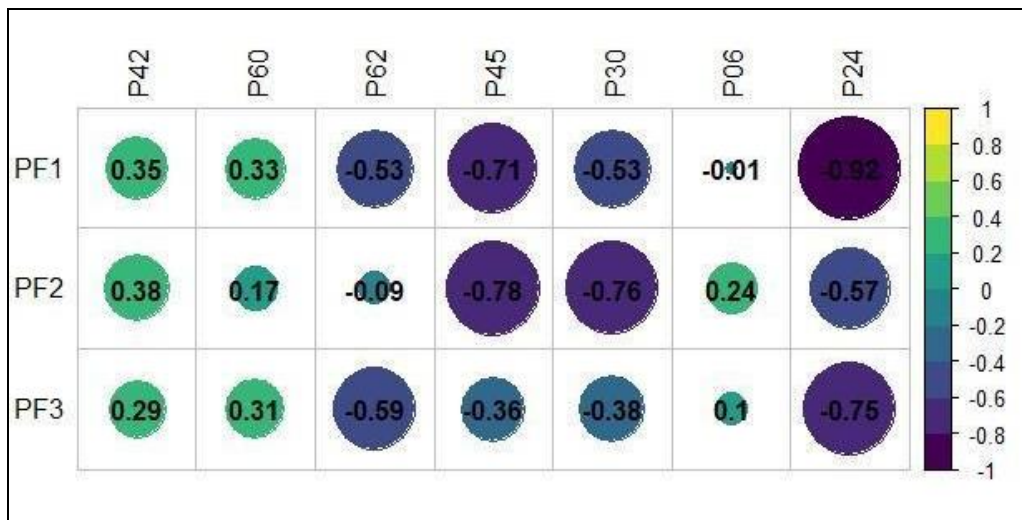
Quanto a C, os maiores valores cumulativos foram observados no ponto 6, com 88,3 mm, enquanto os menores valores foram registrados nos pontos 60 e 24, com 20,6 mm e 23,4 mm, respectivamente, todos para a espécie *X. brasiliensis*. Observa-se que as espécies com maiores valores de C foram também as que apresentaram, em geral, maior AGB, conforme indicado na Tabela 3.1. Isso sugere uma relação positiva entre essas duas variáveis. A análise de correlação utilizando o coeficiente de Pearson (Torres *et al.*, 2020), confirmou uma correlação positiva forte ( $r = 0,7$ ) entre AGB e C.

Em contraste, a correlação entre AGB e ET foi negativa e fraca, indicando que há uma relação inversa entre as variáveis, onde uma não parece influenciar a outra. Conforme mostrado na Tabela 3.1, os valores cumulativos de ET foram mais elevados na *M. willdenowii*, com 331,4 mm e 357,3 mm nos pontos 30 e 24, respectivamente. Valores acima de 300 mm também foram observados em *X. brasiliensis* no ponto 60 e em *C. langsdorffii* no ponto 45, com 328,9 mm e 316,0 mm, respectivamente. As demais espécies apresentaram os seguintes valores: *B. salicifolius* no ponto 42 com 284,27 mm e *X. brasiliensis* nos pontos 62 e 6 com 293,42 mm e 278,96 mm, respectivamente.

### **3.4 Relação entre a umidade e distribuição da biomassa radicular no perfil do solo e características hidrológicas do solo em cada ponto de monitoramento**

Para avaliar a relação entre a umidade do solo média (%) e o total da distribuição da biomassa radicular ( $\text{kg m}^{-3}$ ) no perfil do solo realizou-se uma análise com base no coeficiente de Pearson, cujos resultados estão na Figura 3.5. A maior parte dos resultados mostra uma correlação negativa entre a umidade do solo e a distribuição de biomassa, indicando que a umidade do solo é inversamente proporcional à concentração da biomassa radicular ao longo do perfil.

Figura 3.5 – Matriz de correlação entre a biomassa radicular (BR) e umidade do solo em cada ponto de monitoramento.

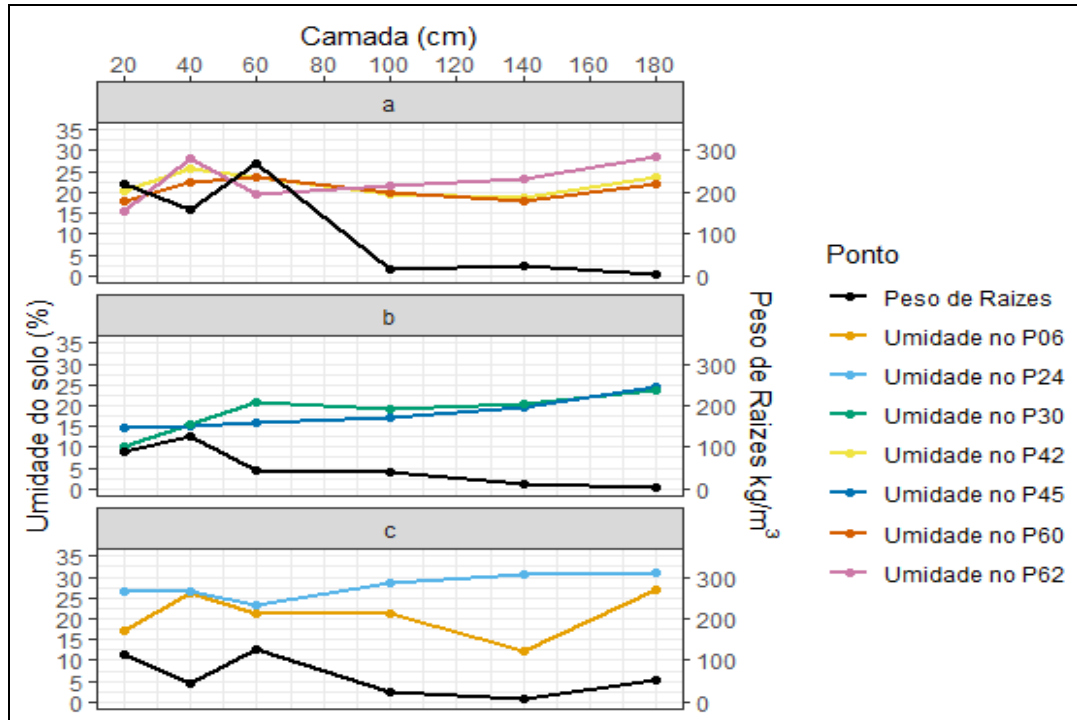


Fonte: Do autor (2024)

Considerando a proximidade dos pontos de monitoramento da umidade do solo e de amostragem da biomassa radicular, observam-se as seguintes correlações: entre o perfil 1 (PF1) com os pontos 42 e 60, há uma correlação positiva fraca e com o ponto 62, uma correlação negativa moderada; entre o perfil 2 (PF2) e os pontos 45 e 30 existe uma correlação negativa alta, e para os pontos 6 e 24 com o perfil 3 (PF3), há uma correlação positiva fraca e uma negativa alta, respectivamente (Torres *et al.*, 2020).

Na Figura 3.6 são apresentados os gráficos que ilustram a relação entre a umidade e a distribuição da biomassa radicular ao longo do perfil do solo. Observa-se que não há uniformidade na distribuição das raízes no perfil do solo entre os três locais de amostragem, embora a maior massa de raízes tenha sido observada nas camadas mais superficiais (20 a 60 cm) em todos os locais.

Figura 3.6 – Relação da distribuição da biomassa de raízes e umidade no perfil do solo, considerando a proximidade entre os pontos de amostragem de raízes (a, b, c) e de monitoramento de umidade do solo (P6, P24, P30, P42, P45, P60 e P62).



Fonte: Do autor (2024)

Essa diferenciação apresentada na Figura anterior está relacionada ao fato de que há maior atividade biológica, bem como maior disponibilidade de nutrientes nesta camada, levando a uma maior concentração de raízes finas (Basílio *et al.*, 2024; Leonova *et al.*, 2022), assim como à distribuição espacial da umidade no solo (Kühnhammer *et al.*, 2020; Kulmatiski *et al.*, 2017).

Considerando todos os pontos de monitoramento, a umidade foi sempre menor na camada mais superficial (0 – 20 cm), variável nas camadas intermediárias (20 – 140 cm) e maior na camada mais profunda (140 – 180 cm). Observa-se ainda que a umidade tem uma relação inversa com a concentração da biomassa radicular nas camadas superficiais e profundas do solo durante o período seco, enquanto nas camadas intermediárias, o aumento da umidade se contrapõe à concentração das raízes nas profundidades de 20 cm a 40 cm (perfil 2) e de 40 cm a 60 cm (perfis 1 e 3). Conforme Basílio *et al.* (2024); Kulmann *et al.* (2022); Ratuchne *et al.* (2016), as raízes finas são restritas às camadas superiores do solo, uma vez que estas são fundamentais para absorção de água e nutrientes da solução do solo. Este fenômeno, afeta mais a umidade das camadas mais superficiais do que as mais profundas.

Um outro fator importante, relacionado às variações da umidade e distribuição das raízes ao longo do perfil do solo são as propriedades hídricas do solo. Os dados apresentados na Tabela 3.2, mostram que há uma variabilidade espacial destas propriedades na FESM, assim como ao longo do perfil do solo.

Tabela 1.2 – Atributos físico-hídricos do solo do remanescente da FESM em estudo até 180 cm de profundidade.

Espécies/ponto	Variáveis	Valores médios das variáveis hidrológicas do solo em cada camada do perfil (cm)						Média
		20	40	60	100	140	180	
<b>P42: <i>B. salicifolius</i></b> <b>P60 e 62: <i>X. brasiliensis</i></b> (Perfil 1)	<b>Ksat (cm h<sup>-1</sup>)</b>	95,4	124,45	47,59	24,85	15,27	8,82	<b>52,73</b>
	<b>Ds (g cm<sup>-3</sup>)</b>	0,87	0,94	0,98	0,98	1,05	0,95	<b>0,96</b>
	<b>PT (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>)</b>	0,68	0,54	0,64	0,64	0,62	0,68	<b>0,63</b>
<b>P45: <i>C. langsdorffii</i></b> <b>P30: <i>M. argyrophylla</i></b> (Perfil 2)	<b>Ksat (cm h<sup>-1</sup>)</b>	110,46	35,3	21,34	20,2	6,09	6,84	<b>33,37</b>
	<b>Ds (g cm<sup>-3</sup>)</b>	0,91	0,81	0,95	0,93	0,94	0,91	<b>0,91</b>
	<b>PT (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>)</b>	0,68	0,71	0,66	0,72	0,67	0,67	<b>0,69</b>
<b>P6: <i>X. brasiliensis</i></b> <b>P24: <i>M. argyrophylla</i></b> (Perfil 3)	<b>Ksat (cm h<sup>-1</sup>)</b>	74,35	53,51	97,02	22,09	10,34	2,33	<b>43,27</b>
	<b>Ds (g cm<sup>-3</sup>)</b>	0,98	1,00	0,95	0,99	0,98	0,97	<b>0,98</b>
	<b>PT (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>)</b>	0,65	0,64	0,66	0,64	0,65	0,65	<b>0,65</b>

Fonte: Do autor (2024)

A condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) em todos os pontos apresentou uma tendência de ser maior nas camadas mais superficiais do solo, diminuindo com o aumento da profundidade. No ponto de amostragem (Perfil 1), próximo das parcelas com as espécies *B. salicifolius* (P24) *X. brasiliensis* (60 e 62), a Ksat foi mais elevada na camada de 20-40 cm (124,45 cm h<sup>-1</sup>), e a média de todo perfil foi de 52,73 cm h<sup>-1</sup>, sendo superior em comparação aos demais perfis. No ponto de amostragem (Perfil 2), localizado próximo às espécies *C. langsdorffii* (P45) *M. willdenowii* (P30), a Ksat foi maior na camada de 0-20 cm (110,46 cm h<sup>-1</sup>), com uma média de perfil de 33,37 cm h<sup>-1</sup>, inferior aos demais pontos. Já no ponto de amostragem (Perfil 3), próximo às parcelas com as espécies representativas *X. brasiliensis* (P6) e *M. willdenowii* (P24), a Ksat foi mais elevada na camada de 40-60 cm (97,02 cm h<sup>-1</sup>) e a média do perfil foi de 43,27 cm h<sup>-1</sup>.

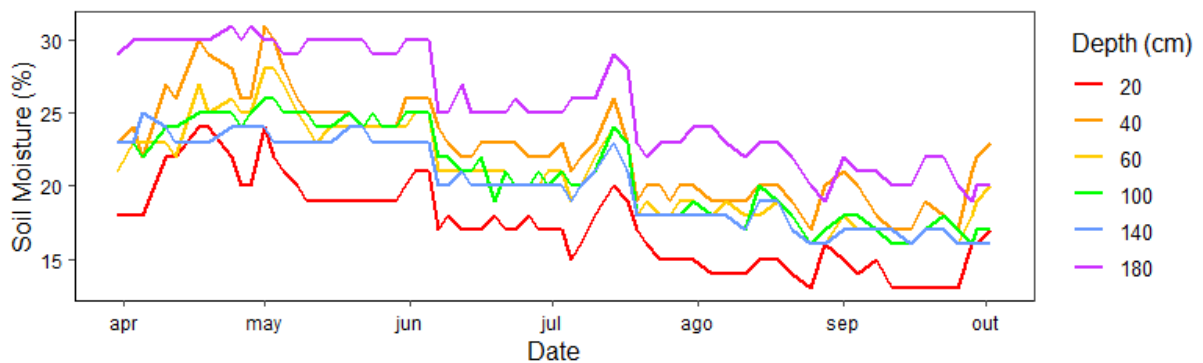
O comportamento da  $K_{sat}$  ao longo do perfil do solo é atribuído a distribuição da biomassa radicular no perfil do solo, à orientação e às alterações na estrutura do solo, resultantes da decomposição serapilheira que forma a matéria orgânica. A concentração da matéria orgânica, pode variar em função da concentração das espécies florestais. A matéria orgânica permite a maior agregação e coesão das partículas do solo, principalmente nas camadas superficiais, diminuindo a densidade do solo e aumentando a taxa de infiltração (Barbosa *et al.*, 2019; Junqueira Júnior *et al.*, 2017). De acordo com os valores de densidade do solo (Tabela 3.2), observa-se uma variação ao longo do perfil em todos os pontos de amostragem, com os valores próximos às respectivas médias. Os valores variaram de 0,87 a 1,05  $g\ cm^{-3}$  no Perfil 1, de 0,81 a 0,95  $g\ cm^{-3}$  no Perfil 2 e de 0,95 a 1,00  $g\ cm^{-3}$  no Perfil 3.

Para porosidade total do solo, os valores seguem o mesmo padrão observado para a densidade do solo ao longo do perfil, com variações também próximas das médias. A porosidade variou de 0,54 a 0,68  $cm^3\ cm^{-3}$  no Perfil 1, de 0,66 a 0,72  $cm^3\ cm^{-3}$  no Perfil 2 e de 0,64 a 0,65  $cm^3\ cm^{-3}$  no Perfil 3. Tais valores são característicos de um solo que apresenta uma estrutura granular, com alta permeabilidade, conforme relatado por Guauque-Mellado *et al.* (2022) e Junqueira Júnior *et al.* (2017).

### 3.5 Comportamento espacial e temporal da umidade no perfil do solo na FESM

As séries temporais de umidade do solo (médias dos 7 pontos), obtidas no intervalo de 2 dias, revelam uma tendência geral de redução da umidade do solo ao longo do período de avaliação em todas as 6 profundidades monitoradas no perfil do solo (Figura 3.7).

Figura 3.7 – Variação da umidade no perfil do solo durante o período de estudo (período seco) no remanescente da FESM.

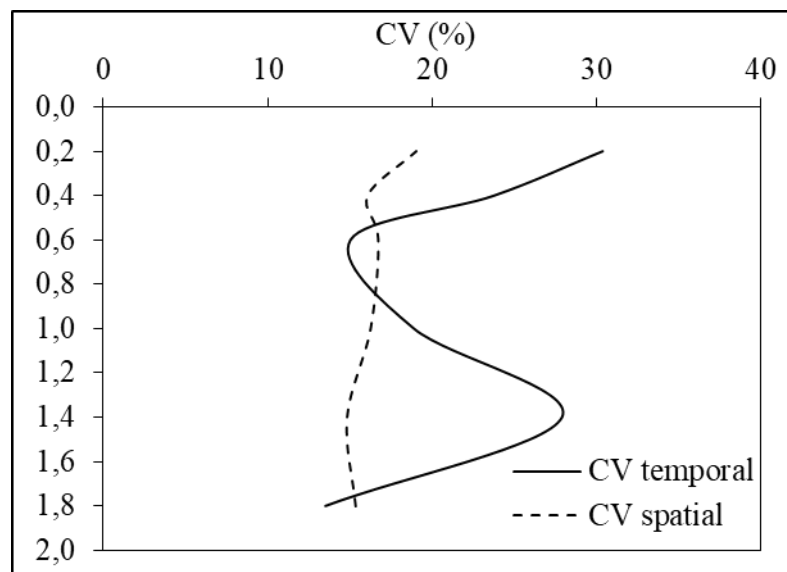


Fonte: Do autor (2024)

Durante todo o período de avaliação, a profundidade de 20 cm apresentou uma umidade mais baixa (17,49%) em comparação com as outras profundidades. A profundidade de 40 cm exibiu uma umidade maior (22,78%) em relação às profundidades de 60, 100 e 140 cm (21,09%, 21,01% e 20,34%, respectivamente), embora todas mantiveram uma umidade quase na mesma faixa, superando a de 20 cm. A maior umidade foi registrada na profundidade de 180 cm (25,71%) em comparação com as demais. Esta tendência foi observada por Toriyama *et al.* (2013) em perfil do solo de 1000 cm em uma floresta tropical durante o período seco.

Para analisar o comportamento da umidade média no tempo ( CVt) e no espaço (CVs) no perfil do solo, foi examinado o coeficiente de variação (CV), conforme ilustrado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Distribuição de indicadores de estabilidade temporal e espacial de  $\theta$  FESM para o período de monitoramento.



Fonte: Do autor (2024)

O CVt apresenta uma maior variação nas profundidades de 20, 40 e 140 cm, com os respectivos percentuais de 30,4%, 23,8% e 27,9%. O CVs apresenta uma variação moderada entre as profundidades, com tendência a se estabilizar com o aumento da profundidade. Seus percentuais estão na faixa de 14,9% a 19,0%, com o maior percentual observado na profundidade de 20 cm.

A maior variabilidade, principalmente a temporal nas profundidades de 20 e 40 cm é atribuída à concentração da biomassa de raízes, com maior destaque para as finas

responsáveis pela absorção de água solo, assim como às alterações que ocorrem no solo, principalmente nas camadas superficiais, resultantes da decomposição da serapilheira, criando condições ótimas para infiltração.

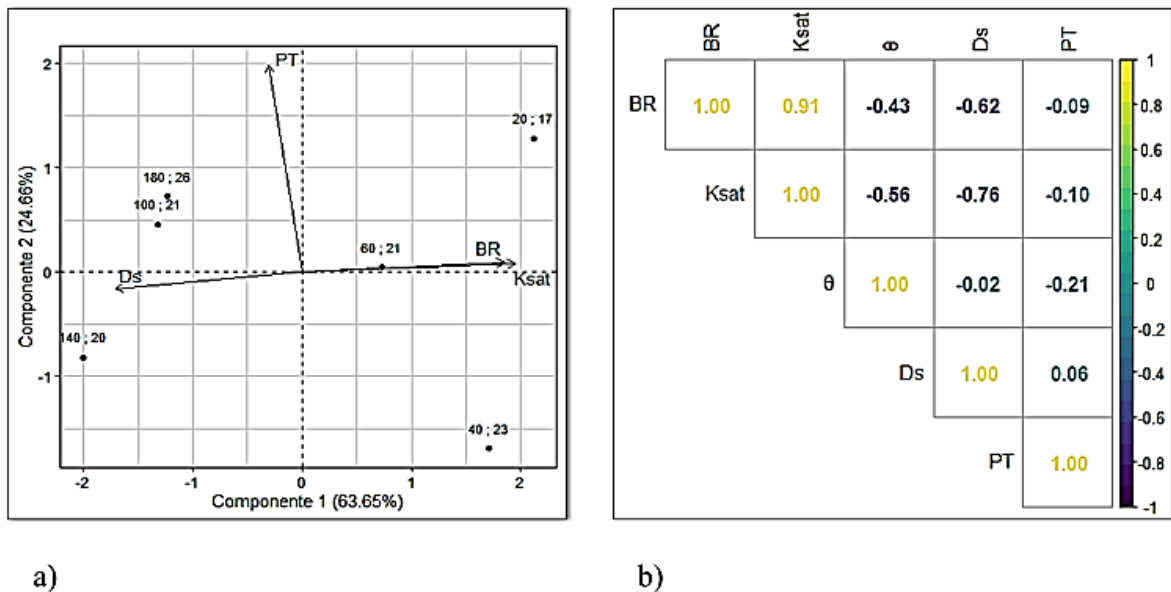
Alterações significativas foram observadas por Junqueira Júnior *et al.* (2017) até 40 cm de profundidade, no mesmo local do presente estudo, que atribui à influência direta da vegetação e de processos climáticos como chuva e evaporação, afetando menos as camadas mais profundas. Mudanças significativas também foram observadas por Xião *et al.* (2014) na bacia de Zhifanggou do planalto de Loess, China, em um perfil do solo de 0 a 30cm, o que é atribuído ao processo de reabastecimento – consumo -reabastecimento.

Em relação à profundidade de 140 cm, um dos prováveis fatores de variação da umidade são as características hídricas do solo, com destaque para densidade do solo que mostram uma tendência de aumento com o aumento das profundidades, tal como constatou Mantovani *et al.* (2024) no mesmo local do estudo. Nesta camada, a concentração da biomassa de raízes foi menor comparando com as demais camadas. Carranza *et al.* (2021) afirmam que os fluxos preferenciais gerados pela atividade biológica, como raízes grossas de plantas mortas ou animais presentes em áreas florestais, são também importantes na variabilidade da umidade nas camadas profundas.

Nas análises de redundância para umidade do solo em função da BR, Ksat, Ds e PT no perfil do solo (Figura 3.9a), mostra-se que o primeiro eixo (componente 1) foi capaz de explicar 63,65% do total da variabilidade espacial da umidade do solo no perfil em função da BR e Ksat, positivamente, nas camadas superficiais (20, 40, e 60 cm), e Ds e PT, negativamente, nas camadas mais profundas (100, 140 e 180). O segundo eixo (componente 2) conseguiu explicar 24,66%, positivamente para todas as variáveis, exceto Ds, que foi negativo, nas camadas de 20, 60, 100 e 180 cm. Todas as variáveis juntas respondem por cerca de 88,31% da variabilidade dos componentes no perfil do solo dentro do remanescente.

Segundo os dados apresentados na Figura 3.9b, existe uma correlação positiva forte entre a BR e Ksat, e essas mesmas variáveis têm correlações negativas com as variáveis Ds e PT. A correlação entre a umidade do solo e as variáveis BR e Ksat, mostra-se negativa, moderada e fraca, respectivamente, enquanto com as variáveis Ds e PT é negativa fraca, o que, de uma forma geral, indica que a umidade do solo é inversamente proporcional às variáveis estudadas ao longo do perfil do solo.

Figura 3.9 – Análise de redundância para  $\theta$  em função das BR, Dp, PT e Ds no perfil do solo (a) e análise de correlação entre as variáveis (b).

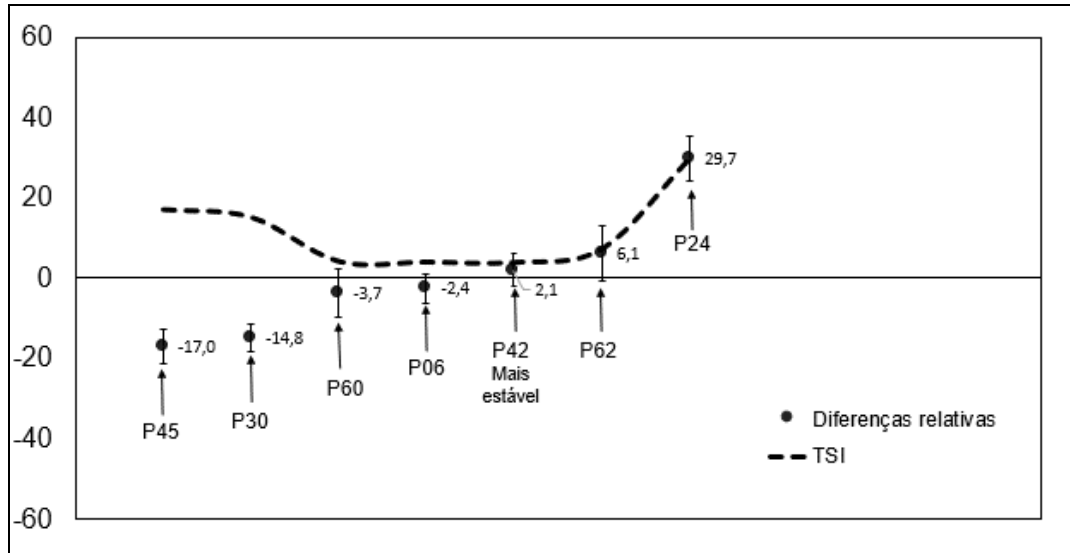


Fonte: Do autor (2024)

### 3.6 Estabilidade temporal da umidade nos pontos com espécies avaliadas na FESM

Na análise do Índice de Estabilidade Temporal para o ponto 42, que conta com o monitoramento de uma *B. salicifolius*, esse apresenta a maior estabilidade, indicando um armazenamento contínuo de água no solo durante o período seco (Figura 3.10). Uma estabilidade moderada foi observada nos pontos 60, 6 e 62. Os pontos 45, 30 e 24 são os que apresentaram menor estabilidade durante o período de avaliação, indicando flutuações significativas do armazenamento da água no perfil do solo durante o período seco.

Figura 3.10 – Diferença relativa média e Índice de estabilidade Temporal (TSI) para o SWS considerando os pontos de monitoramento (abril a setembro de 2023) com espécies representativas da Mata Atlântica.



Fonte: Do autor (2024)

Estes resultados revelam informações importantes do ponto de vista espaço-temporal do armazenamento da água no solo em diferentes locais, que pode ser dependente das condições estruturais do solo (topografia e características hídricas do solo), do clima (distribuição das chuvas) e da distribuição das espécies (densidade das árvores por área). Segundo Mello *et al.* (2019) e Terra *et al.* (2018) a estrutura da floresta é um fator importante para explicar a variabilidade espacial da umidade no solo. Rodrigues *et al.* (2020), por sua vez observaram no mesmo local de estudo que as áreas planas que abrangem os pontos 42, 62 e 46, estão relacionadas com maior umidade, enquanto as áreas mais onduladas (pontos 45 e 30) estão relacionadas com baixas umidades, no mesmo remanescente.

## 4 CONCLUSÕES

Neste estudo, o balanço hídrico individualizado para espécies representativas da Mata Atlântica foi realizado em 7 pontos no interior da FESM, abrangendo 4 espécies: *Blefarocalice salicifolius* (Kunth), *Miconia willdenowii*, *Xylopia brasiliensis* e *Copaifera langsdorffii*. Com base nos resultados chegaram-se às seguintes conclusões:

- a) O padrão das chuvas influenciou os valores de ET, a EP e o comportamento da C nas espécies monitoradas. Esse fato está associado à arquitetura das copas, densidade do dossel e as características morfológicas de cada espécie.
- b) Os maiores valores de GR, EP e C registrados nos meses de abril, agosto e setembro, refletem a variabilidade sazonal do período de avaliação especialmente nas espécies *X. brasiliensis* e *M. willdenowii*, que apresentaram maior variação de EP e menores valores de C.
- c) O SWS diminuiu ao longo do período seco, e variando conforme a precipitação. O comportamento do SWS variou entre as espécies, com destaque para a *M. willdenowii*, que apresentou os maiores valores. As condições de maior SWS foram também importantes para o comportamento da ET.
- d) O DAP foi a principal característica vegetativa relacionada a AGB. Por outro lado, quanto maior for AGB maior será C e esta relação é inversa entre AGB e ET nas espécies avaliadas.
- e) As raízes das espécies da FESM concentram-se principalmente nas camadas superficiais, associadas à disponibilidade de nutrientes e à demanda por água, com distribuição não uniforme na área da FESM.
- f) A concentração de biomassa de raízes ao longo do perfil do solo e as características hidrológicas do solo, contribuem na variabilidade da umidade do solo, principalmente nas primeiras camadas. Existe uma relação inversa entre a umidade do solo e a concentração de biomassa de raízes, indicando que maior concentração de raízes resulta em menor umidade do solo.
- g) Os locais com maior concentração das espécies, onde estão inseridas a *Blefarocalice salicifolius* e *Xylopia brasiliensis*, apresentam a maior tendência de estabilidade no armazenamento da água no solo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASÍLIO, J. J. N. *et al.* **Fine Root Density Dynamics and Carbon Stock of Eucalyptus spp.: Interplay of Age, Genotype, and Edaphoclimatic Conditions.** *Plants*, v. 13, n. 11, p. 1503, 2024.
- CARRANZA, C., NOLET C., PEZIJ, M. e PLOEG, M. **Root zone soil moisture estimation with Random Forest.** *Journal of Hydrology*. v. 593, 125840. 2021.
- CHAVE, J. *et al.* **Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees.** *Global change biology*, v. 20, n. 10, p. 3177-3190, 2014.
- CHRISTINA, M. *et al.* **Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest.** *Functional Ecology*, v. 31, n. 2, p. 509-519, 2017.
- COSTA, F. V. *et al.* **Arquitetura da planta e diversidade de galhas associadas à *Copaifera langsdorffii* (Fabaceae).** *Ecología austral*, v. 20, n. 1, p. 9-17, 2010.
- DE OLIVEIRA, V. A. *et al.* **Spatiotemporal modelling of soil moisture in an Atlantic forest through machine learning algorithms.** *European Journal of soil science*, v. 72, n. 5, p. 1969-1987, 2021.
- DENG, S. *et al.* **On the development and recovery of soil moisture deficit drought events.** *Journal of Hydrology*, v. 632, p. 130920, 2024.
- EMBRAPA **Manual de Métodos de Análise de Solo.** Brasília, DF. 3ª edição revista e ampliada. ISBN 978-85-7035-771-7 Embrapa, 2017.
- GAO, L., LV, Y., WANG, D., TAHIR, M. e PENG, X. **Can shallow-layer measurements at a single location be used to predict deep soil water storage at the slope scale?** *Journal of Hydrology* v. 531, Part 3, p. 534-542. 2015.
- GHIMIRE, C. P. *et al.* **Measurement and modeling of rainfall interception by two differently aged secondary forests in upland eastern Madagascar.** *Journal of Hydrology*, v. 545, p. 212-225, 2017.

GOLDENBERG, R.; BACCI, L.F.; CADDAH, M.K.; MEIRELLES, J. 2020. **Miconia in Flora do Brasil 2020**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Available at: <<http://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB9779>>. Accessed on: 03 out. 2024

GUAUQUE-MELLADO, D. *et al.* **Evapotranspiration under drought conditions: the case study of 2 a seasonally dry Atlantic Forest**. *Atmosphere* 2022, 13, x. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>

HAN, Q., SOL, K., WANG, H. C., PEI, Z., CHEN, H. W., YANG, J. e XIAOTIAN, S. **Water Balance Characteristics of the Salix Shelterbelt in the Kubuqi Desert**. *Forests* 2024, 15(2), 278; <https://doi.org/10.3390/f15020278>.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, 2020. **Normais climatológicas do Brasil 1991-2020**. Available: <https://portal.inmet.gov.br/normais#> Acesso: 24/07/2024

INPE **Painel El Niño 2023-2024 BOLETIM MENSAL** No. 05 2024

JONES, H. *et al.* **Water balance, surface conductance and water use efficiency of two young hybrid-poplar plantations in Canada's aspen parkland**. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 246, n. August 2016, p. 256–271, 2017.

JUNQUEIRA JUNIOR J. A. *et al.* **Rainfall partitioning measurement and rainfall interception modelling in a tropical semi-deciduous Atlantic Forest remnant**. *Agricultural and Forest Meteorology* v. 275, p.170-183. 2019.

JUNQUEIRA JUNIOR, J. A. *et al.* **Time-stability of soil water content (SWC) in an Atlantic Forest - Latosol site**. *Geoderma* 288, 64–78, 2017.

KING, J. R. *et al.* **Multiscale analysis of nutrient uptake by plant roots with sparse distribution of root hairs: nonstandard scaling**. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, v. 81, n. 4, p. 1361-1388, 2021.

KÜHNHAMMER, K. *et al.* **Investigating the root plasticity response of *Centaurea jacea* to soil water availability changes from isotopic analysis**. *New Phytologist* v. 226, p. 98-110. 2020.

KULMANN, M. S. S. *et al.* **Physicalchemical aspects of the soil influence the fine roots parameters of *Pinus elliottii* Engelm. stand in southern of Brazil.** *Scientia Forestalis*, 50, e3839. 2022. <https://doi.org/10.18671/scifor.v50.17>

KULMATISKI A., ADLER P. B., STARK J. M. e TREDENNICK A. T. **Water and nitrogen uptake are better associated with resource availability than root biomass.** *Ecosphere* v. 8: e01738. 2017.

LEONOVA, A. *et al.* **Fine root mortality under severe drought reflects different root distribution of *Quercus robur* and *Ulmus laevis* trees in hardwood floodplain forests.** *Trees*, v. 36, n. 3, p. 1105-1115, 2022.

LIANG, Xinlian *et al.* **International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories.** *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, v. 144, p. 137-179, 2018.

LIMA, J. A. S., VILLELA, D. M., FILHO, B. C. e PÉREZ, D. V. **Biomassa radicular fina em fragmentos da Mata Atlântica Fluminense.** *Floresta*, Curitiba, PR, v. 41, n. 1, p. 27-38, 2011.

LIU, M. *et al.* **Influence of canopy and topographic position on soil moisture response to rainfall in a hilly catchment of Three Gorges Reservoir Area, China.** *Journal of Geographical Sciences*, 30 (6): p. 949-968, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11442-020-1764-1>

LUO, Z. *et al.* **Influence of root distribution on preferential flow in deciduous and coniferous forest soils.** *Forests*, v. 10, n. 11, p. 986, 2019.

MANTOVANI, V. A. *et al.* **Biotic and abiotic drivers of stemflow carbon enrichment ratio in tropical trees.** *Trees*, v. 37, n. 2, p. 467-483, 2023.

MANTOVANI, V. A. *et al.* **Spatial and Temporal Patterns in Carbon and Nitrogen Inputs by Net Precipitation in Atlantic Forest, Brazil.** *Forest Science*, XX, 1–12, 2022. <https://doi.org/10.1093/forsci/xfab056>

MELLO, C.R. *et al.* **Water balance in a neotropical forest catchment of southeastern Brazil.** *Catena* 173, p. 9–21. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.046>

MIRANDA, E. N. *et al.* **Efeito de variáveis de copa em funções de afilamento.** *Advances in Forestry Science*, v. 7, n. 2, p. 1057-1066, 2020.

MORAIS, V. A. *et al.* **Spatial and vertical distribution of litter and belowground carbon in a Brazilian Cerrado vegetation.** *Cerne*, v. 23, n. 1, p. 43-52, 2017.

OLIVEIRA-FILHO, A. T., SCOLFORO, J. R. S., MELLO, J. M. **Composição florística e estrutura comunitária de um remanescente de floresta semidecídua montana em Lavras, MG.** *Revista Brasileira de Botânica, São Paulo*, v. 17, n. 2, p. 167-182, 1994.

PIZARRO, R. *et al.* **The Large-Scale Effect of Forest Cover on Long-Term Streamflow Variations in Mediterranean Catchments of Central Chile.** *Sustainability* v.14 (8), 4443. 2022. <https://doi.org/10.3390/su14084443>

PLOTON, P. *et al.* **Closing a gap in tropical forest biomass estimation: taking crown mass variation into account in pantropical allometries.** *Biogeosciences*, v. 13, n. 5, p. 1571-1585, 2016.

RAMOS, H. M. N. *et al.* **Above-and belowground carbon stocks of two organic, agroforestry-based oil palm production systems in eastern Amazonia.** *Agroforestry systems*, v. 92, n. 2, p. 221-237, 2018.

RANZINI, M., ARCOVA, F. C. S. e CICCIO, V. **Long-term water balance in small catchments in the Atlantic Forest.** *Revista do Instituto Florestal*. v. 34 n. 1. p. 20-30 2022. <http://dx.doi.org/10.24278/2178-5031.202234102>

RATUCHNE, L. C. *et al.* **Estado da arte na quantificação de biomassa em raízes de formações florestais.** *Floresta e Ambiente*; 23(3): p. 450-462, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.131515> ISSN 2179-8087

REGO, S. S. *et al.* **Caracterização morfológica do fruto, da semente e do desenvolvimento da plântula de *Blepharocalyx salicifolius* (HBK) Berg. e *Myrceugenia gertii* Landrum-Myrtaceae.** *Revista Brasileira de Sementes*, v. 32, p. 52-60, 2010.

RODRIGUES, A. F. *et al.* **Modeling canopy interception under drought conditions: The relevance of evaporation and extra sources of energy.** *Journal of Environmental Management* 292, 112710, 2021a.

RODRIGUES, A. F. *et al.* **Water balance of an Atlantic Forest remnant under a prolonged drought period.** *Ciência e Agrotecnologia*, 45: e008421, 2021b. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202145008421>.

RODRIGUES, A. F. *et al.* **Soil water content and net precipitation spatial variability in an Atlantic Forest remnant.** *Acta Scientiarum - Agronomy*, v. 42, p. 1–13, 2020.

RODRIGUES, A. F. *et al.* **Throughfall spatial variability in a neotropical forest: Have we correctly accounted for time stability?** *Journal of Hydrology*. v. 608, 127632. 2022.

SCOLFORO, H. F. *et al.* **A new model of tropical tree diameter growth rate and its application to identify fast-growing native tree species.** *Forest Ecology and Management*, v. 400, p. 578-586, 2017.

SILVA, B. *et al.* **Area-wide evapotranspiration monitoring at the crown level of a tropical mountain rain forest.** *Remote sensing of environment*, v. 194, p. 219-229, 2017.

SOUZA, C. R. *et al.* **Long-term ecological trends of small secondary forests of the atlantic forest hotspot: A 30-year study case.** *For. Ecol. Manage.* 489, 119043, 2021 <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119043>.

SOUZA, R. *et al.* **Resposta da vegetação à sazonalidade das chuvas e à variabilidade interanual em florestas tropicais secas.** *Processos Hidrológicos* , v. 30, n. 20, p. 3583-3595, 2016.

TAN, Z. H. *et al.* **Condutância de superfície para evapotranspiração de florestas tropicais: Cálculos, variações e controles.** *Agricultural and Forest Meteorology* , v. 275, p. 317-328, 2019.

TERRA, M. C. N. S. *et al.* **Stemflow in a neotropical forest remnant: vegetative determinants, spatial distribution and correlation with soil moisture.** *Trees*, 32 p. 323-335, 2018. Doi:10.1007/s00468-017-1634-3

TORRES, F. L. R. *et al.* **Validação de diferentes bases de dados de precipitação nas bacias hidrográficas do Sapucaí e São Francisco.** *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 27, p. 368-404, 2020.

VASCONCELOS, T. N. C.; PROENÇA, C. E. B.. **Blepharocalyx in Flora do Brasil 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro.** 2020 Disponível em: <<http://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB10262>>. Acesso em: 04 out. 2024

WANG, Y. *et al.* **In situ biomass estimation at tree and plot levels: What did data record and what did algorithms derive from terrestrial and aerial point clouds in boreal forest.** Remote Sensing of Environment, v. 232, p. 111309, 2019.

WEI, Z. *et al.* **Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration.** Geophysical Research Letters, v. 44, n. 6, p. 2792-2801, 2017

XIAO, L. *et al.* **Soil moisture variability under different land uses in the Zhifanggou catchment of the Loess Plateau, China.** Arid land research and management, v. 28, n. 3, p. 274-290, 2014.

ZHU, X. *et al.* **Soil moisture temporal stability and spatio-temporal variability about a typical subalpine ecosystem in northwestern China.** Hydrological Processes, v. 34, n. 11, p. 2401-2417, 2020.