

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Influência do manejo de podas na dinâmica hídrica de sistemas agroflorestais
sucessionais**

Arthur Prado Barboza
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

ARTHUR PRADO BARBOZA

**Influência do manejo de podas na dinâmica hídrica de sistemas agroflorestais
sucessionais**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Elpidio I. Fernandes Filho

Coorientador: Bruno N. F. Vasconcelos

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

B239i
2025
Barboza, Arthur Prado, 1990-
Influência do manejo de podas na dinâmica hídrica de
sistemas agroflorestais sucessionais / Arthur Prado Barboza. –
Viçosa, MG, 2025.

1 dissertação eletrônica (148 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Solos, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.269>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Sistemas agroflorestais. 2. Solos - Umidade. 3. Solos -
Temperatura. 4. Física do Solo. 5. Curva de retenção de água.
I. Fernandes Filho, Elpídio Inácio, 1963-. II. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de
Pós-Graduação em Agroecologia. III. Título.

CDD 22. ed. 634.99

ARTHUR PRADO BARBOZA

**Influência do manejo de podas na dinâmica hídrica de sistemas agroflorestais
sucessionais**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de março de 2025.

Assentimento:

Arthur Prado Barboza
Autor

Elpidio Inacio Fernandes Filho
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 08/05/2025 às 21:17:52 e pelo orientador em 07/04/2026 às 13:13:57. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **DBQG.RW6E.QLZZ** e clique no botão 'Validar documento'.

Às que insistem ver o verde das matas e nele achar beleza.
Às que fazem brotar do chão o verde das matas.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar não poderia deixar de agradecer à minha companheira, esposa, eterna namorada, Cecília. Por todos os momentos em que precisei me ausentar para me dedicar a este mestrado e você cuidou da nossa família, sou imensamente grato. Ao meu filho Ícaro, que cresce vendo o verde brotar do chão. Sua vida me motiva a plantar.

Aos meus pais, Vanda e Cláudio, que cultivaram em mim o desejo pelo saber.

À minha família que ficou na cidade, que acha bonita a minha vinda para a roça.

Ao meu orientador Elpídio, que abraçou as minhas ideias e me deu a liberdade que eu precisava para realizar este trabalho, além das preciosas revisões.

Ao meu coorientador Bruno, cujo trabalho com sistemas agroflorestais sucessionais é fonte de inspiração.

Ao Laboratório de Física do Departamento de Solos da UFV, na figura do técnico Claudinho, pelo suporte para realização das análises.

Ao Núcleo Terrantar da UFV, na figura dos professores Márcio Francelino e Davi Gjorup, pela concessão dos equipamentos para a realização desta pesquisa bem como todo o suporte para instalação e manutenção.

Aos amigos da Pós-Graduação em Agroecologia, pelo incentivo e pelo compartilhar.

Aos agricultores e agricultoras que tive o prazer de conhecer durante esta trajetória, que me servem de inspiração e que tanto me ensinam. Vocês fazem a Agroecologia!

Ao povo brasileiro, pelo financiamento da educação pública. Que meu trabalho sirva de alguma forma para a construção de um país mais verde para todos nós.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

BARBOZA, Arthur Prado, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2025. **Influência do manejo de podas na dinâmica hídrica de sistemas agroflorestais sucessionais.** Orientador: Elpidio Inacio Fernandes Filho. Coorientador: Bruno Nery Fernandes Vasconcelos.

Os sistemas agroflorestais (SAFs) surgem como alternativa que visa otimizar o espaço produtivo a partir da combinação de espécies arbóreas com as culturas agrícolas, apresentando potencial para redução da perda de solo, incremento da biodiversidade e do sequestro de carbono. Mais especificamente, foi cunhado o termo Agricultura Sintrópica (AS) na qual os SAFs se apresentam com maior riqueza de espécies, maior adensamento de plantas, ocupação dos diferentes estratos e intensa ciclagem de material orgânico através de podas recorrentes. A AS é baseada em processos, cabendo a(o) agricultor(a) identificar os momentos em que se deve intervir, manejando o sistema através das podas. As podas possuem a finalidade de estimular o crescimento das plantas, incorporar material orgânico no solo, servindo de cobertura e ajudando no controle da vegetação espontânea, na retenção de água no solo, na melhoria da qualidade física do solo e contribuindo na ciclagem de nutrientes. Muitos trabalhos tem estudado os benefícios à física do solo em SAFs com níveis de diversidade de espécies ainda simplificados. Pouca atenção tem sido dada aos SAFs sucessionais – aqueles que seguem os princípios da AS. A melhoria das propriedades físicas do solo contribui diretamente para a regulação de parte do ciclo hidrológico local. No entanto, o uso e à dinâmica da água em SAFs ainda é objeto de pesquisa que apresenta controvérsia. Por um lado, SAFs favorecem a infiltração de água no solo e a redução da erosão hídrica. Por outro, reduzem a precipitação efetiva e aumentam a transpiração, devolvendo mais água à atmosfera. Neste contexto, o manejo de podas das árvores é um ponto chave, direcionando o sistema para uma maior ou menor conservação de água no solo. O estudo ocorreu no Sítio Jardim da Irmandade, no sul do Parque Estadual da Serra do Brigadeiro, município de Muriaé-MG. Os SAFs tem sido implementados desde 2016, com foco na produção de café (*Coffea arabica*) e juçara (*Euterpe edulis*). O trabalho teve como objetivo geral avaliar a influência da AS nas propriedades ligadas ao balanço hídrico do solo. Foram objetivos específicos: i) caracterizar os sistemas quanto à riqueza e densidade de espécies arbóreas; ii) analisar as propriedades de condutividade hidráulica saturada, capacidade de água disponível, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, densidade do solo e densidade de partícula nas profundidades 0-5 cm e 5-

10 cm; iii) elaborar a curva de retenção de água no solo e calcular o índice S; iv) realizar um mutirão agroecológico para manejo de podas nas áreas; v) caracterizar a abertura do dossel provocada pelo manejo; vi) monitorar por um ano hidrológico as variáveis precipitação interna, umidade do solo nas camadas de 10 cm e 80 cm, temperatura do solo a 10 cm e temperatura do ar a 1 m; vii) monitorar com câmeras multiespectrais os índices de vegetação e temperatura das áreas manejadas. Os resultados mostram que o manejo da AS promoveu melhoria contínua da qualidade física do solo à medida que o sistema vai se complexificando, favorecendo fluxos de infiltração e percolação que se somam aos demais benefícios ambientais trazidos pelos SAFs. As podas reduziram a interceptação da precipitação, o que resultou em maior número de frentes de molhamento que chegaram nas camadas superficial (10 cm) e subsuperficial (80 cm) e em maior velocidade de percolação da água, criando mais oportunidade de recarga hídrica. Também contribuíram para a manutenção de valores mais elevados de umidade no solo quando comparado com as áreas sem manejo, especialmente na camada subsuperficial (80 cm). Por outro lado, as podas promoveram maior incidência de radiação solar à superfície, incidindo em maior grau na temperatura do solo do que na do ar, por conta do efeito de mistura. A complexidade dos SAFs sucessionais criou condições microclimáticas que contribuíram para maiores índices de vegetação e manutenção de menores temperaturas locais. O manejo de podas deve observar as caract

Palavras-chave: Agricultura Sintrópica; Umidade; Temperatura; Física do solo; Curva de retenção

ABSTRACT

BARBOZA, Arthur Prado, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2025. **Influence of pruning management on the water dynamics of successional agroforestry systems.** Adviser: Elpidio Inacio Fernandes Filho. Co-adviser: Bruno Nery Fernandes Vasconcelos.

Agroforestry systems (AFSs) emerge as an alternative that aims to optimize productive space by combining tree species with agricultural crops, with the potential to reduce soil loss, increase biodiversity and carbon sequestration. More specifically, the term Syntropic Agriculture (SA) was coined, in which AFSs have greater species richness, greater plant density, occupation of different strata and intense cycling of organic material through recurrent pruning. SA is based on processes, and it is up to the farmer to identify the moments when intervention should be taken, managing the system through pruning. Pruning is intended to stimulate plant growth, incorporate organic material into the soil, serving as mulching and helping to control spontaneous vegetation, retain water in the soil, improve soil physical quality and contribute to nutrient cycling. Many studies have studied the benefits to soil physics in AFSs with still simplified levels of species diversity. Improving soil physical properties directly contributes to regulating part of the local hydrological cycle. However, the use and dynamics of water in AFSs is still subject of controversial research. On the one hand, AFSs favor water infiltration into the soil and reduce water erosion. On the other hand, they reduce effective precipitation and increase transpiration, returning more water to the atmosphere. In this context, tree pruning management is a key point, directing the system towards greater or lesser conservation of soil water. The study took place at Sítio Jardim da Irmandade, in the south of the Serra do Brigadeiro State Park, in the municipality of Muriaé-MG. AFSs have been implemented since 2016, with a focus on the production of coffee (*Coffea arabica*) and juçara (*Euterpe edulis*). The study had the general objective of evaluating the influence of SA on properties linked to the soil water balance. The specific objectives were: i) to characterize the systems in terms of tree species richness and density; ii) to analyze the properties of saturated hydraulic conductivity, available water capacity, total porosity, macroporosity, microporosity, soil density and soil particle density at depths of 0-5 cm and 5-10 cm; iii) to develop the soil water retention curve and calculate the S index; iv) to carry out an agroecological task force to manage pruning in the areas; v) to characterize the canopy opening caused by pruning; vi) to monitor internal precipitation, soil moisture in the 10 cm and 80 cm layers, soil

temperature at 10 cm and air temperature at 1 m for one hydrological year; vii) to monitor the vegetation and temperature indices of the managed areas with multispectral cameras. The results show that SA management promoted continuous improvement in the physical quality of the soil as the system became more complex, favoring infiltration and percolation flows that add to the other environmental benefits brought by the AFSs. Pruning reduced the interception of precipitation, which resulted in a greater number of wetting fronts that reached surface (10 cm) and subsurface (80 cm) layer and in a greater speed of water percolation, creating more opportunities for water recharge. On the other hand, pruning promoted a greater incidence of solar radiation at the surface, affecting the soil temperature to a greater degree than the air temperature, due to the mixing effect. The complexity of the successional AFSs created microclimatic conditions that contributed to higher vegetation indices and the maintenance of lower local temperatures. Pruning management should take into account the phenological characteristics of the crops, in order to ensure adequate environmental conditions for their full development. The inclusion of the management variable, here attributed to pruning, brings new perspectives to studies on AFSs.

Keywords: Syntropic Agriculture; Soil moisture; Temperature; Soil physics; Water retention curve

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo.....	34
Figura 2: Esquema ilustrativo do processo sucessional em agroflorestas.....	35
Figura 3: Curvas de retenção de água no solo para a camada 0-5 cm.....	49
Figura 4: Curvas de retenção de água no solo para a camada 5-10 cm.....	49
Figura 5: Curva de retenção de água no solo na camada de 80 cm.....	53
Figura 6: Localização da área de estudo.....	71
Figura 7: Pluviômetro de referência instalado na propriedade.....	73
Figura 8: Instalação dos sensores de umidade em trincheira cavada sob as linhas de plantio.....	74
Figura 9: Instalação dos termômetros para monitoramento da temperatura do ar.....	76
Figura 10: Pontos de tomada de dados das imagens multiespectrais.....	79
Figura 11: Realização do manejo de podas em formato de mutirão.....	80
Figura 12: Abertura do dossel antes e após os manejos realizados.....	81
Figura 13: Exemplo de leituras realizadas nos pluviômetros.....	83
Figura 14: Precipitações mensais acumuladas.....	84
Figura 15: Correlações entre as precipitações internas e a precipitação aberta.....	85
Figura 16: Resultado da calibração dos sensores de umidade.....	88
Figura 17: Dados de umidade coletados nas áreas do <i>SAF_Simples</i> a 10 cm.....	89
Figura 18: Dados de umidade coletados nas áreas do <i>SAF_Simples</i> a 80 cm.....	90
Figura 19: Dados de umidade coletados nas áreas do <i>SAF_Interm</i> a 10 cm.....	90
Figura 20: Dados de umidade coletados nas áreas do <i>SAF_Interm</i> a 80 cm.....	90
Figura 21: Dados de umidade coletados nas áreas do <i>SAF_Denso</i> a 10 cm.....	91
Figura 22: Dados de umidade coletados nas áreas do <i>SAF_Denso</i> a 80 cm.....	91
Figura 23: Umidades médias mensais na camada superficial (10 cm).....	92
Figura 24: Umidades médias mensais na camada subsuperficial (80 cm).....	92
Figura 25: Permanência de umidade no solo na camada de 10 cm - <i>SAF_Simples</i>	98
Figura 26: Permanência de umidade no solo na camada de 80 cm - <i>SAF_Simples</i>	98
Figura 27: Permanência de umidade no solo na camada de 10 cm - <i>SAF_Denso</i>	99
Figura 28: Permanência de umidade no solo na camada de 80 cm - <i>SAF_Denso</i>	99
Figura 29: Hidrograma típico de uma série de precipitações pontuais.....	100

Figura 30: Caracterização das frentes de molhamento – <i>SAF_Simples</i>	103
Figura 31: Caracterização das frentes de molhamento – <i>SAF_Interm</i>	103
Figura 32: Caracterização das frentes de molhamento – <i>SAF_Denso</i>	104
Figura 33: Temperaturas médias diárias do solo a 10 cm – <i>SAF_Simples</i>	105
Figura 34: Temperaturas médias diárias do solo a 10 cm – <i>SAF_Interm</i>	105
Figura 35: Temperaturas médias diárias do solo a 10 cm – <i>SAF_Denso</i>	106
Figura 36: Temperaturas médias mensais do solo a 10 cm de profundidade	106
Figura 37: Temperaturas máximas diárias do solo a 10 cm – <i>SAF_Simples</i>	110
Figura 38: Temperaturas máximas diárias do solo a 10 cm – <i>SAF_Interm</i>	111
Figura 39: Temperaturas máximas diárias do solo a 10 cm – <i>SAF_Denso</i>	111
Figura 40: Temperaturas máximas médias mensais do solo a 10 cm de profundidade	112
Figura 41: Temperaturas médias diárias do ar a 1 m – <i>SAF_Simples</i>	115
Figura 42: Temperaturas médias diárias do ar a 1 m – <i>SAF_Interm</i>	115
Figura 43: Temperaturas médias diárias do ar a 1 m – <i>SAF_Denso</i>	115
Figura 44: Temperaturas médias mensais do ar a 1 m	116
Figura 45: Temperaturas máximas diárias do ar a 1 m – <i>SAF_Simples</i>	120
Figura 46: Temperaturas máximas diárias do ar a 1 m – <i>SAF_Interm</i>	120
Figura 47: Temperaturas máximas diárias do ar a 1 m – <i>SAF_Denso</i>	120
Figura 48: Temperaturas médias máximas mensais do ar a 1 m.....	121
Figura 49: Temperatura monitorada nas áreas de estudo	125
Figura 50: Índice NDVI monitorado nas áreas de estudo	126
Figura 51: Índice SAVI monitorado nas áreas de estudo	127
Figura 52: Índice GCVI monitorado nas áreas de estudo.....	128
Figura 53: Matriz de correlação entre os índices obtidos.....	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fertilidade química do solo nas áreas de SAFs e de pastagem	39
Tabela 2: Análise textural do solo nas áreas de SAFs e de pastagem	40
Tabela 3: Caracterização arbórea das áreas de estudo.....	40
Tabela 4: Comparação entre os resultados de Ks, Ds, Dp, PT, MiP e Map pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade	45
Tabela 5: Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água no solo pela equação de van Genuchten (1980)	49
Tabela 6: Comparação entre os resultados de CC, CAD, Índice S e θ_s pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade	50
Tabela 7: Valores de referência de capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) para as camadas de 10 cm e 80 cm	53
Tabela 8: Caracterização da composição arbórea de cada SAF estudado.....	70
Tabela 9: Valores de referência de capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) para as camadas de 10 cm e 80 cm	75
Tabela 10: Abertura do dossel antes e após os manejos realizados.....	81
Tabela 11: Correlações entre as precipitações internas mensais e a precipitação aberta	85
Tabela 12: Volume de dados coletados – Umidade do solo a 10 e 80 cm de profundidade	89
Tabela 13: Umidades médias mensais do solo a 10 cm de profundidade	92
Tabela 14: Umidades médias mensais do solo a 80 cm de profundidade	93
Tabela 15: Frequência de dados com relação aos valores de referência de CC e PMP	94
Tabela 16: Frentes de molhamento contabilizadas nas camadas de 10 e 80 cm	101
Tabela 17: Volume de dados coletados – Temperatura do solo a 10 cm de profundidade	104
Tabela 18: Temperaturas médias mensais do solo a 10 cm de profundidade.....	106
Tabela 19: Quebras de tendência das séries diárias de temperatura do solo a 10 cm	109
Tabela 20: Temperaturas médias do solo a 10 cm em função das quebras de tendência identificadas.....	109
Tabela 21: Temperaturas médias máximas mensais do solo a 10 cm de profundidade	112
Tabela 22: Quebras de tendência das séries diárias de temperatura máxima do solo a 10 cm	113
Tabela 23: Temperaturas médias máximas do solo a 10 cm em função das quebras de tendência identificadas.....	113
Tabela 24: Volume de dados coletados – Temperatura do ar a 1 m.....	114

Tabela 25: Temperaturas médias mensais do ar a 1 m.....	116
Tabela 26: Quebras de tendência das séries diárias de temperatura do ar a 1 m.....	118
Tabela 27: Temperaturas médias do ar a 1 m em função das quebras de tendência identificadas	119
Tabela 28: Temperaturas médias máximas mensais do ar a 1 m	121
Tabela 29: Quebras de tendência das séries diárias de variação de temperatura máxima do ar a 1 m.....	122
Tabela 30: Médias de temperatura máxima do ar a 1 m em função das quebras de tendência identificadas.....	122
Tabela 31: Resultados de temperatura, índices NDVI, SAVI e GCVI nas áreas estudadas ..	129

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
<i>Degradação de terras, um problema agrícola brasileiro.....</i>	<i>15</i>
<i>Sistemas agroflorestais e o balanço hídrico do solo</i>	<i>16</i>
<i>A Agricultura Sintrópica e o manejo de podas em sistemas agroflorestais</i>	<i>19</i>
<i>Pesquisas científicas sobre Agricultura Sintrópica</i>	<i>20</i>
<i>Hipótese de pesquisa</i>	<i>22</i>
Referências Bibliográficas	22
SISTEMAS AGROFLORESTAIS SUCESSIONAIS COMO FERRAMENTA PARA CONSERVAÇÃO DE SOLO E ÁGUA NA ZONA DA MATA MINEIRA	30
<i>Resumo</i>	<i>30</i>
<i>1. Introdução</i>	<i>31</i>
<i>2. Material e Métodos.....</i>	<i>33</i>
2.1. Caracterização da Área de Estudo.....	33
2.2. Amostragem do solo e análises físicas.....	35
2.3. Análises estatísticas.....	39
<i>3. Resultados e Discussão</i>	<i>39</i>
3.1. Caracterização da Área de Estudo.....	39
3.2. Análises da física do solo	44
3.3. Curva de retenção de água no solo.....	48
<i>4. Conclusões.....</i>	<i>54</i>
<i>5. Limitações do estudo e sugestão para estudos futuros</i>	<i>55</i>
<i>Referências Bibliográficas.....</i>	<i>55</i>
INFLUÊNCIA DO MANEJO DE PODAS NA DINÂMICA TÉRMICA E HÍDRICA DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS SUCESSIONAIS	64
<i>Resumo</i>	<i>64</i>
<i>1. Introdução</i>	<i>65</i>
<i>2. Material e Métodos.....</i>	<i>69</i>
2.1. Caracterização da Área de Estudo.....	69
2.2. Manejo e caracterização das podas	71

2.3.	Monitoramento da precipitação interna.....	72
2.4.	Monitoramento da umidade do solo.....	73
2.5.	Monitoramento da temperatura do solo e do ar.....	75
2.6.	Imageamento multiespectral das áreas monitoradas	77
3.	<i>Resultados e Discussão</i>	79
3.1.	Manejo e caracterização das podas	79
3.2.	Monitoramento da precipitação interna.....	83
3.3.	Monitoramento da umidade do solo.....	87
3.4.	Monitoramento da temperatura do solo e do ar.....	104
3.5.	Imageamento multiespectral das áreas monitoradas	123
4.	<i>Conclusões</i>	133
5.	<i>Limitações do estudo e sugestão para estudos futuros</i>	134
	<i>Referências Bibliográficas</i>	136
	CONCLUSÕES GERAIS	146

INTRODUÇÃO GERAL

Degradação de terras, um problema agrícola brasileiro

A degradação de terras é um problema global, que incide fortemente no Brasil (Guerra *et al.*, 2014). Estima-se que cerca de 22% das terras brasileiras estejam degradadas, sendo a principal responsável por este cenário a atividade agropecuária com uso de práticas ambientalmente inadequadas (Bai *et al.*, 2008).

O principal mecanismo físico pelo qual perde-se solo é denominado erosão hídrica, que consiste no desprendimento e arraste de partículas do solo, a partir do escoamento superficial da ação da água da chuva ou mesmo da irrigação (EMBRAPA, 2012). A perda de solo por erosão hídrica em território brasileiro é estimada em 616,5 Mt.ano⁻¹ em lavouras anuais, com custo de reposição de nutrientes da ordem de 1,3 bilhões de dólares por ano (Dechen *et al.*, 2015).

O potencial de perda de solo por erosão é função de fatores como a intensidade da chuva, tipo de solo, declividade do terreno e o uso/cobertura do solo. Por ser a variável de maior interferência antrópica, a cobertura/uso do solo é a componente mais importante no controle da erosão hídrica e da conservação de solos (Bertoni e Lombardi Neto, 1990). O uso adequado do solo interfere diretamente no ciclo hidrológico pois previne a erosão, controla inundações e o assoreamento dos rios, assim como abastece os lençóis freáticos que alimentam os cursos de água, garantindo o suprimento de água para a agricultura, pecuária, indústrias e abastecimento humano (EMBRAPA, 2012). Assim, faz-se necessário pensar alternativas de produção agrícola que considerem o manejo e a conservação do solo e da água.

Na região da Zona da Mata Mineira, especificamente, o uso predominante do solo é de pastagem para produção de gado de corte e de leite, e estima-se que 60% das pastagens estejam degradadas (Hott *et al.*, 2023), incorrendo em redução da qualidade do solo e da conservação de água. Franco (2011) aponta que as pastagens são também o uso da terra predominante em Áreas de Preservação Permanente (APPs) na Zona da Mata, destacando a necessidade de propostas de sistemas agrícolas que conciliem preservação com a capacidade produtiva dos agricultores que nestas áreas habitam. A degradação de pastagens, após uso contínuo, incorre em aumento da densidade do solo, principalmente na primeira camada, o que afeta a absorção de água e nutrientes pelas plantas, bem como reduz a infiltração da água e conseqüentemente a sua percolação para camadas subsuperficiais, favorecendo o processo erosivo por escoamento superficial (Müller *et al.*, 2004).

Sistemas agroflorestais e o balanço hídrico do solo

A Agroecologia é a ciência que estabelece uma base teórica para a agricultura não industrial, fornecendo princípios para os estudos dos ecossistemas tanto produtivos quanto preservadores dos recursos naturais (Altieri, 2012). Dentro deste contexto, os sistemas agroflorestais (SAFs) agroecológicos, procuram se aproximar das características ecológicas dos ecossistemas de florestas nativas, incorporando-os aos sistemas agrícolas produtivos, a partir de técnicas de manejo ecológico do solo como: sombreamento com árvores, plantio direto, adubações verdes, otimização da ciclagem de nutrientes, cobertura morta, entre outras (Primavesi, 2002; Young, 1989). Assim, os benefícios que os SAFs prestam à conservação do solo são inúmeros. Destaca-se, ainda, a implantação de SAFs como forma de reduzir a vulnerabilidade dos sistemas agrícolas às mudanças climáticas (IPCC, 2019) e como ferramenta para manutenção da biodiversidade (Schroth *et al.*, 2004).

É sabido que o teor de carbono no solo possui relação estreita com a estabilização de agregados do solo, favorecendo fluxos de infiltração e, conseqüentemente, reduzindo o potencial erosivo do solo (Tisdall e Oades, 1982). O incremento de carbono no solo pode se dar por diferentes práticas de manejo, tais como: sistema de plantio direto, rotação de culturas e integração lavoura-pecuária-floresta (Pulrolnik, 2009). Além disso, a manutenção da vegetação na unidade de produção, em especial de espécies arbóreas, cria bioporos que favorecem o fluxo de infiltração de água no solo, aumentando o volume de água armazenada e reduzindo o escoamento superficial (Kautz, 2014; Idris e Mahrup, 2015; Nespoulous *et al.*, 2019).

De forma geral, os benefícios à física do solo têm sido estudados em sistemas agroflorestais simplificados, com poucas espécies envolvidas, tendo sido verificada a melhoria de propriedades como macroporosidade, porosidade total, densidade do solo e condutividade hidráulica. Essas melhoras são associadas ao acúmulo de material orgânico nas linhas de plantio (Carvalho *et al.*, 2004; Loaiza Puerta *et al.*, 2018; Cherubin *et al.*, 2018; Stöcker *et al.*, 2020; Matos *et al.*, 2022) e são progressivas no tempo (Stöcker *et al.*, 2020). Propriedades como a densidade do solo e a porosidade são também determinantes para o fluxo de gás carbônico pelo solo, sendo, portanto, variáveis de importante monitoramento em um contexto de enfrentamento às mudanças climáticas (Blagodatsky e Smith, 2012).

A melhora dos atributos físicos do solo contribui diretamente para a regulação de parte do ciclo hidrológico no sítio produtivo a partir da maior infiltração e manutenção de água no solo (Loaiza Puerta *et al.*, 2018). Especificamente, estudos conduzidos em áreas de sistemas agroflorestais já mostram seu impacto na maior produção de água na propriedade (Oliveira e Kazay, 2015), na maior eficiência de uso da água no solo (Ong *et al.*, 2017; Muñoz-Villers *et al.*, 2020) e mesmo na proteção direta de nascentes (Miccolis *et al.*, 2016). Entretanto, se por um lado o plantio de espécies arbóreas junto com a cultura principal apresenta inúmeros benefícios, no que concerne à competição por água e ao uso da água de forma geral, ainda persistem dúvidas, sendo, portanto, um objeto de pesquisa que apresenta grande controvérsia (Wang *et al.*, 2017; Bruijnzeel, 2004).

O balanço hídrico de uma parcela de solo, de forma geral, pode ser definido pelos fluxos de precipitação, interceptação, escoamento superficial, infiltração e evapotranspiração (Tucci, 1993). Embora cada componente do balanço hídrico seja de considerável importância, nos estudos sobre a dinâmica hídrica de SAFs, algumas componentes são mais estudadas que outras.

Voltolini *et al.* (2018) fizeram uma breve sistematização da literatura, mostrando que em parte dos experimentos houve maior eficiência do uso da água em SAFs, enquanto em outros houve maior perda por transpiração nestes sistemas, indicando uma maior retirada da água do solo frente a cultivos convencionais. A modelagem de Wang *et al.* (2021) conclui que a maior transpiração total do SAF não afetou o teor de umidade em camadas profundas do solo (>200 cm), estando mais restrita à camada mais superficial (0-100 cm). Mapa (1995) verificou que apesar da maior transpiração, a presença de árvores contribuiu para a manutenção de maior umidade no solo, resultando num saldo de disponibilidade de água similar à de um cultivo convencional.

No que concerne à precipitação, Monteith *et al.* (1991) concluem que a implantação de árvores aumenta a interceptação da precipitação, ocasionando maior perda de água para a atmosfera. Wang *et al.* (2017) verificaram que em SAF houve 16% menos infiltração de água em comparação ao sistema convencional devido à interceptação de água pela copa das árvores. Na Zona da Mata especificamente, Oliveira Júnior e Dias (2005) mediram a precipitação efetiva em um fragmento secundário de Mata Atlântica, em Viçosa-MG, obtendo resultados da ordem de 80%, ou seja, incorrendo em perdas por interceptação de 20%.

Da água que chega ao solo, parte dela infiltra e outra esco superficialmente. Estes dois processos são considerados antagônicos, isto é, há maior taxa de escoamento à medida que a

taxa de infiltração se reduz (Spohr *et al.*, 2009). Santana *et al.* (2020) constataram uma maior infiltração sob a copa das árvores de um SAF, associada à maior presença de matéria orgânica no solo. Carvalho *et al.* (2004) avaliaram o solo de um SAF em comparação com um de sistema de cafeicultura convencional e verificaram que a maior presença de matéria orgânica esteve relacionada à maior agregação do solo, menor densidade e maior porosidade, fatores que favorecem o processo de infiltração. Resultados similares foram encontrados por Loaiza Puerta *et al.* (2018) através da incorporação de matéria orgânica e realização de plantio direto sem revolvimento do solo, mesmo sem a adição de árvores no sistema de plantio.

A água que infiltra ao solo é devolvida para a atmosfera através dos processos de evaporação e da transpiração das plantas (Libardi, 2018). Neste contexto, Monteith *et al.* (1991) verificaram que em SAF a temperatura do solo e a velocidade do vento foram inferiores em comparação ao sistema convencional, resultando em menores perdas por evaporação direta do solo. Entretanto, os autores calculam que este ganho não é superior à perda adicional provocada pela interceptação da precipitação pelas árvores. Carvalho (2011) verificou que a drenagem profunda (>160 cm) do solo em SAFs, foi inferior a observada no sistema convencional, pelo mesmo motivo.

Outro papel que os SAFs desempenham nos sistemas agrícolas é a regulação térmica das áreas. Monteith *et al.* (1991) indicam que o sombreamento proporcionado pelas árvores pode reduzir as temperaturas máximas dos cultivos entre 5°C e 10°C. Através da retenção de parte da radiação pelas copas das árvores, menor ganho de temperatura é visto no ar e na primeira camada de solo, o que resulta em menor evaporação direta do solo (Lin, 2007). Outro ponto importante é a serrapilheira gerada pelas árvores, que constitui uma camada física à entrada de calor no solo e à evaporação direta (Horton *et al.*, 1996). Relação inversa entre a cobertura do dossel e a temperatura média do solo foi observada por Gomes *et al.* (2016) em SAFs na Zona da Mata Mineira.

Então, por um lado a implantação de SAFs parece favorecer a infiltração de água no solo e a consequente redução do escoamento superficial rápido, assim como da erosão hídrica em sistemas agrícolas. Estes fatores contribuem para o maior armazenamento de água no solo e, consequentemente, maior recarga hídrica. Por outro lado, a redução da precipitação efetiva, associada à maior transpiração total, parecem devolver à atmosfera mais água, resultando em menor permanência de água no solo. Diante dessa amplitude de evidências, Ilstedt *et al.* (2016) teorizam que há um ponto intermediário de cobertura por árvores que resulta em máxima

recarga subterrânea de água em agroflorestas. Para sistemas simplificados, com poucas árvores, os benefícios de aumento da infiltração e melhora da qualidade física do solo, de forma geral, são limitados. No outro extremo, os sistemas muito adensados estão sujeitos a perdas de água por interceptação e evapotranspiração que superam o ganho adicional proveniente das mas taxas de infiltração.

Destaca-se que os benefícios às propriedades físicas do solo em agroflorestas devem ser entendidos em função não somente da presença ou não de árvores, mas também pelo manejo praticado. Moreira *et al.* (2017) encontraram velocidade de infiltração em agrofloresta de açaí bem inferior à de uma pastagem degradada, associando esta diferença à mecanização praticada na agrofloresta para a colheita do açaí. Evidenciando, portanto, um aspecto de manejo e não proveniente da constituição do sistema agrícola em si.

A Agricultura Sintrópica e o manejo de podas em sistemas agroflorestais

Dando um passo além na prática da implantação e manejo de sistemas agroflorestais, foi cunhado pelo suíço Ernst Götsch o termo *Agricultura Sintrópica* – também chamado por alguns de “sistemas agroflorestais sucessionais biodiversos”, ou seja, baseados no processo de sucessão ecológica. Nesta ótica, os SAFs se apresentam com maior riqueza de espécies, maior adensamento de plantas, maior ocupação dos estratos e intensa ciclagem de material orgânico. A Agricultura Sintrópica (AS) é baseada em processos, cabendo a(o) agricultor(a) identificar os momentos em que se deve manejar o sistema através das podas, que visam otimizar a ciclagem de nutrientes e potencializar o crescimento vegetativo dos componentes do sistema. As podas também possuem a finalidade fundamental de aportar material orgânico no solo, servindo de cobertura para controle da vegetação espontânea, retenção de água no solo e a promoção de benefícios a médio e longo prazo como a ciclagem de nutrientes e a melhora da qualidade física e biológica do solo (Young, 1989; Jackson *et al.*, 1998; Rabello e Sakamoto, 2022).

Neste contexto, para além da simples implantação de um SAF, o manejo das podas das espécies arbóreas parece ser o ponto chave onde a atuação do(a) agricultor(a) pode direcionar o sistema para um maior ou menor dinamismo, influenciando conseqüentemente na maior ou menor permanência de água no solo. Jackson *et al.* (1998) incorporaram o efeito das podas na sua modelagem de SAFs no Quênia e verificaram que os teores de umidade no solo ficaram

próximos aos do cultivo convencional após as podas drásticas, devido a interrupção da interceptação e da transpiração realizadas pelas árvores. Além disso, a poda é o manejo através do qual o(a) agricultor(a) se vale para a maior incorporação de material orgânico no solo, o que traz diversos benefícios em termos de fertilidade e de conservação dos solos (Rabello e Sakamoto, 2022; Young, 1989).

Na Zona da Mata Mineira, região do presente estudo, a implantação de SAFs com foco em café foi estudada por Carvalho *et al.* (2005), Souza *et al.* (2010) e Oliveira (2013) tendo sido identificado um elenco de espécies com características positivas para a composição e estratificação de agroflorestas. Duas das características das árvores consorciadas com café consideradas positivas pelos(as) agricultores(as) são justamente a produção de biomassa e facilidade de podas, que vão resultar no maior aporte de material orgânico ao solo. Ainda que nestes trabalhos não seja feita menção à AS, entende-se que muitos dos(as) agricultores(as) na Zona da Mata manejam áreas de agroflorestas com ênfase na permanente complexificação e estratificação dos sistemas. Os níveis de diversidade e densidade de indivíduos arbóreos nos SAFs com café na Zona da Mata são amplamente diversificados.

Pesquisas científicas sobre Agricultura Sintrópica

Na literatura são poucos os artigos encontrados que abordam especificamente os SAFs sucessionais regidos pela AS. As principais referências encontradas são de relatos de experiência, resumos e artigos em congressos e simpósios de Agroecologia a nível nacional. A dissipação dessa forma de manejo tem ocorrido principalmente através da massificação pelas redes sociais, atrelada a busca atual por sistemas produtivos que possibilitem a geração de renda no curto prazo, ao mesmo tempo que resultem em impacto positivo no meio ambiente (Guimarães e Mendonça, 2018). Há uma estimativa de que cerca de 5000 famílias agricultoras tenham adotado esse tipo de prática no Brasil, além de experiências mais isoladas em outros países (Andrade *et al.*, 2020). Ou seja, há ainda a necessidade de comprovar cientificamente as proposições apresentadas por esse tipo de manejo, visando a sua validação tanto do ponto de vista agrônomo, ambiental quanto socioeconômico (Fogaça *et al.*, 2023).

Trabalhos como os de Fogaça *et al.* (2023), Baleeiro (2020), Baleeiro e DeMarco Jr. (2018) e Andrade e Pasini (2015) abordam a questão epistemológica da AS, apresentando o conceito de sintropia por uma abordagem energética, sendo uma contraposição ao conceito termodinâmico

de entropia. A entropia, pela 2ª lei da termodinâmica, se refere ao grau de desordem do sistema, que sempre aumenta na ausência de trabalho. Na proposição epistemológica da sintropia, o fluxo da vida caminha no sentido oposto, do simples para o complexo, no sentido da convergência ao invés da dissipação. Segundo essa proposição, este é o mecanismo que rege, na natureza, a sucessão ecológica natural (Andrade e Pasini, 2022). A compreensão do conceito de sintropia envolve não somente uma abordagem física ou termodinâmica, mas também perpassa por campos de conhecimento como: comunicação, engenharia, agronomia e ecologia. Ou seja, refere-se a uma ideia altamente transdisciplinar e, por conta disso, insere-se no bojo da Agroecologia (Baleeiro, 2020).

Trabalhos como os de Pereira e Castro (2024) e Guimarães e Mendonça (2022) apresentam a AS por um caráter mais prático, detalhando os princípios de funcionamento deste tipo de manejo, suas principais características e sugestões para implementação de SAFs sucessionais. Os princípios fundamentais que norteiam a implantação deste tipo de sistema são: alta biodiversidade, estratificação, sucessão e cobertura do solo. As podas se apresentam, então, como uma ferramenta principal para realização destes princípios.

Outros trabalhos, como os de Oliveira *et al.* (2024), Fernandes *et al.* (2020), Kuff *et al.* (2020), Carnicel *et al.* (2019) e Avila *et al.* (2019), mais ligados à extensão rural, buscam relatar a construção do conhecimento sobre a AS, a partir de experiências práticas com agricultores(as) e técnicos(as) e em ambientes de formação como escolas e universidades. As experiências normalmente são centradas tanto no caráter produtivo quanto na temática ambiental, destacando a possibilidade de recuperação de áreas degradadas através da implantação de SAFs sucessionais.

Os trabalhos de Silva *et al.* (2023) e Barbosa *et al.* (2018) buscam, conceitualmente, a partir de pesquisas bibliográficas sobre SAFs, reforçar a ideia da AS como ferramenta para criação de agroecossistemas resilientes e capazes de prover serviços ambientais desejáveis como a conservação de solo e água.

Provavelmente, a publicação científica mais relevante sobre AS seja o artigo de opinião de Andrade *et al.* (2020) – o único publicado em periódico internacional revisada por pares – que, além de descrever brevemente as premissas da AS, trazem referências de casos de sucesso em que a implantação de SAFs sucessionais foi mais produtiva que sistemas monoculturais da mesma cultura principal. Para além deste artigo, não foram encontrados artigos científicos que avaliem impactos específicos dos SAFs sucessionais no ambiente. Diante do exposto,

considera-se que o presente trabalho se situa na fronteira do pioneirismo nesse tipo de abordagem, buscando evidenciar a influência deste tipo de manejo nas propriedades físicas do solo e na sua dinâmica hídrica.

Hipótese de pesquisa

O manejo de podas em sistemas agroflorestais sucessionais, baseados nos princípios da Agricultura Sintrópica, contribui para a melhoria da qualidade física do solo e influencia na dinâmica térmica e hídrica dos solos sob sistemas agroflorestais.

Referências Bibliográficas

ALTIERI, M. **Agroecologia**: bases científicas para uma agricultura sustentável. 3^a ed. Expressão Popular. 400 p. 2012.

ANDRADE, D.; PASINI, F. **Vida em sintropia**: agricultura sintrópica de Ernst Götsch explicada. Ed. Labrador, São Paulo, Brasil, 2022.

ANDRADE, D. V. P.; PASINI, F. S. Implantação e manejo de agroecossistema segundo os métodos da agricultura sintrópica de Ernst Gotsch. **Cadernos de Agroecologia**, v. 9, n. 4, 2015.

ANDRADE, D.; PASINI, F.; SCARANO, F. R. Syntropy and innovation in agriculture. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 45, p. 20-24, 2020.

AVILA, J. E.; BERTOLINI, M. P.; LIMA, L. A.; VAZ, J. M.; BORGES, C. L. P. Agricultura Convencional x Agricultura Sintrópica: Um Estudo Comparativo Entre as Práticas de Produção. **Cadernos de Agroecologia** - ISSN 2236-7934 – Anais do III CPA – Vol. 14, N° 1, Fev. 2019.

BAI, Z. G.; DENT, D.; OLSSON, L.; SCHAEPMAN, M. E. **Global assessment of land degradation and improvement 1**: identification by remote sensing. Wageningen: International Soil Reference Centre (ISRIC). 2008.

BARBOSA, M. A. G. A.; ANJINHO, P. S.; MAUAD, F. F. Análise sobre o balanço hídrico e energético na bacia do Ribeirão Feijão/SP no contexto da agricultura sintrópica. **V Jornada de Gestão e Análise Ambiental da UFSCar**, São Carlos, p. 54-65, outubro, 2018.

BALEEIRO, A. V. F.; DE MARCO JR, P. Bases científicas e epistemológicas para a Agricultura Sintrópica. **Cadernos de Agroecologia** – ISSN 2236-7934 – Anais do VI CLAA, X CBA e V SEMDF – Vol. 13, Nº 1, 2018.

BALEEIRO, A. V. F. Transdisciplinaridade no diálogo entre Agroecologia e Agricultura Sintrópica. **Cadernos de Agroecologia** – ISSN 2236-7934 - Anais do XI Congresso Brasileiro de Agroecologia, São Cristóvão, Sergipe - v. 15, no 2, 2020.

BERTONI, J. e LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 4ª ed. Editora Ícone, São Paulo. 1990.

BLAGODTASKY, S.; SMITH, P. Soil physics meets soil biology: towards better mechanistic prediction of greenhouse gas emissions from soil. **Soil Biol. Biochem.**, 47, 78–92, 2012.

BRUIJNZEEL, L. A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 104, pp. 185–228, 2004.

CARNICEL, J. L. S. *et al.* Quebrando paradigmas: intercâmbio com agricultura sintrópica, Jaguaquara, BA. **Revista Fitos**, Rio de Janeiro, Suplemento, p. 76-81, 2019.

CARVALHO, A. F. **Água e radiação em sistemas agroflorestais com café no território da Serra do Brigadeiro – MG**. Tese D. Sc. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa. 2011.

CARVALHO, A. F.; GJORUP, D. F.; DE OLIVEIRA, G. B.; CARDOSO, I. M.; NONATO, H.; SOUTO, R. L.; BONFIM, V. R. **Sistematização das experiências com sistemas agroflorestais do CTA/ZM**. Relatório Final. Viçosa/MG. 151 p. 2005.

CARVALHO, A. M. X.; MENDES, F. Q.; TAVARES, L. F. SPEED Stat: a free, intuitive, and minimalist spreadsheet program for statistical analyses of experiments. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, 20(3): e327420312, 2020.

CARVALHO, R.; GOEDERT, W. J.; ARMANDO, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1153-1155, 2004.

CHERUBIN, M. R.; CHAVARRO-BERMEO, J. P.; SILVA-OLAYA, A. M. Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. **Agroforest Syst.**, 93, 1741-1753, 2019.

DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. F.; MARIA, I. C. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 2, p.224-233, 2015.

DEXTER, A. R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, 120, p. 201-214, 2004.

DUNKERLEY, D. Organic Litter: Dominance over stones as a source of interrill flow roughness on low-gradient desert slopes at Fowlers Gap, Arid Western NSW, Australia. **Earth Surf. Process. Landforms**, 28, pp. 15–29, 2003.

EMBRAPA **Práticas de conservação de solo e água**. Circular Técnica 133. ISSN 0100-6460. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Campina Grande, PB, Brasil. 2012.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª edição. Rio de Janeiro, RJ. 574 p. 2017

FERNANDES, J. S.; CONCEIÇÃO JÚNIOR, V.; SANTOS, M. A.; CARVALHO, E. S.; FARIAS, G. C.; FIUZA, D. A.; SOARES, B. D. F. Agricultura Sintrópica: Experiências com assentados periurbanos de Vitória da Conquista – BA. **Cadernos de Agroecologia** – ISSN 2236-7934 - Anais do XI Congresso Brasileiro de Agroecologia, São Cristóvão, Sergipe - v. 15, no 2, 2020.

FOGAÇA, B. M.; LESSA, A. J. S.; NASCIMENTO, M. S.; MACHADO NETTO, M. O. Agricultura Sintrópica. **Revista Reiva**, v. 6, n. 1, 2023.

FRANCO, F. S. **Sistemas agroflorestais: uma contribuição para a conservação dos recursos naturais na Zona da Mata de Minas Gerais**. Tese D. Sc. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa. 2011.

FRANCO, F. S.; COUTO, L.; CARVALHO, A. F.; JUCKSCH, I.; FERNANDES FILHO, E. I.; SILVA, E.; MEIRA NETO, J. A. A. Quantificação de erosão em sistemas agroflorestais e convencionais na Zona da Mata de Minas Gerais. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.26, n.6, p.751-760, 2002.

GALVANI, E.; DE LIMA, N. G. B. Fotografias hemisféricas em estudos microclimáticos: Referencial teórico-conceitual e aplicações. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 36 Ed. Especial, p. 215–221, 2014.

GOMES, L. C.; CARDOSO, I. M.; MENDONÇA, E. S.; FERNANDES, R. B. A.; SCHIAVON, V. L.; OLIVEIRA, T. S. Trees modify the dynamics of soil CO₂ efflux in coffee agroforestry systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 224, pp. 30-39, 2016.

GUERRA, A.; FULLEN, M.; JORGE, M.; ALEXANDRE, S. Soil Erosion and Conservation in Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 37, p. 81-91, 2014.

GUIMARÃES, L. A.; MENDONÇA, G. C. Conceitos e princípios práticos da agrofloresta sucessional biodiversa (agricultura sintrópica). In: Carlos Antônio Pelúzio Silva *et al* (Org.). **29ª Semana Agronômica do CCAE-UFES: plantando hoje as riquezas do futuro**. 2. ed. Alegre: Caufes, p. 108-123, 2018.

HORTON, R.; BRISTOW, K. L.; KLUITENBERG, G. J.; SAUER, T. J. Crop residue effects on surface radiation and energy balance – review. **Theor. Appl. Climatol.**, v. 54, pp. 27-37, 1996.

IDRIS, M. H.; MAHRUP. Imposing Biopores in Agroforestry as an Alternative Measure of Climate Adaption in Semi-Arid Tropic of Eastern Indonesia. **Journal of Environment and Earth Science**, Vol.5, No.10, 2015.

ILSTEDT, U.; TOBELLA, A. B.; BAZIÉ, H. R.; BAYALA, J.; VERBEETEN, E.; NYBERG, G.; SANOU, J.; BENEGAS, L.; MURDIYARSO, D.; LAUDON, H.; SHEIL, D.; MALMER, A. Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. **Scientific Reports**, 6, 21930, 2016.

IPCC. **Climate Change and Land**: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. In press. 2019.

JACKSON, N.; SMITH, D.; ROBERTS, J.; WALLACE, J.; ONG, C. **Water Balance of Agroforestry Systems on Hillslopes - Phase II**. Final Technical Report to the Forestry Research Programme, Department for International Development. 70 p. 1998.

KAUTZ, T. Research on subsoil biopores and their functions in organically managed soils: A review. **Renewable Agriculture and Food Systems**. 30(4); 318–327, 2014.

KUFF, H. M.; ALMEIDA, T. M. R.; PRADO, Y. L.; ARAUJO, P. M. P. AGROFLORESTAR: Uma Experiência com a Agricultura Sintrópica. **Cadernos de Agroecologia** –ISSN 2236-7934 –Anais do Agroecol 2024 –Campo Grande, MS-v. 19, n. 02, dez. 2024.

- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 3ª ed. Editora USP, São Paulo. 352 p. 2018.
- LIN, B. B. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 144, pp. 85–94, 2007.
- LOAIZA PUERTA, V.; PUJOL PEREIRA, E.; WITTEWER, R.; VAN DER HEIJDEN, M.; SIX, J. Improvement of soil structure through organic crop management, conservation tillage and grassclover ley. **Soil and Tillage Research**, 180:1-9, 2018.
- MAIA, C. E. Índice S para avaliação da qualidade física do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 35:1959-1965, 2011.
- MATOS, P. S.; CHERUBIN, M. R.; DAMIAN, J. M.; ROCHA, F. I.; PEREIRA, M. G.; ZONTA, E. Short-term effects of agroforestry systems on soil health in Southeastern Brazil. **Agroforest Syst.**, 96:897–908, 2022.
- MICCOLIS, A.; PENEIREIRO, F. M.; MARQUES, H. R.; VIEIRA, D. L. M.; ARCO-VERDE, M. F.; HOFFMANN, M. R.; REHDER, T.; PEREIRA, A. V. B. **Restauração Ecológica com Sistemas Agroflorestais** – Como conciliar conservação com produção. Opções para Cerrado e Caatinga. Guia Técnico. Brasília: Instituto Sociedade, População e Natureza – ISPN/Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal – ICRAF, 2016.
- MONTEITH, J. L.; ONG, C. K.; CORLETT, J. E. Microclimatic interactions in agroforestry systems. **Forest Ecology and Management**, v. 45, pp. 31–44, 1991.
- MOREIRA, W.; SILVA, E.; LIMA, N. T.; ALVES, J. D.; RAYOL, B. Velocidade de Infiltração Básica da Água no Solo em Diferentes Agroecossistemas Amazônicos. **Agrarian Academy**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.4, n.7; p.463-473, 2017.
- MÜLLER, M. M. L.; GUIMARÃES, M. F.; DESJARDINS, T.; MITJA, D. The relationship between pasture degradation and soil properties in the Brazilian amazon: a case study. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 103, pp. 279–288, 2004.
- MUÑOZ-VILLERS, L. E.; GERIS, J.; ALVARADO-BARRIENTOS, M. S.; HOLWERDA, F.; DAWSON, T. E. Coffee and shade trees show complementary use of soil water in a traditional agroforestry ecosystem. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 24, 1649–1668, 2020.
- NESPOULOUS, J.; MERINO-MARTÍN, L.; MONNIER, Y.; BOUCHET, D. C.; RAMEL, M.; DOMBEY, R.; VIENNOIS, G.; MAO, Z.; ZHANG, J. L.; CAO, K. F.; BISSONNAIS, Y. L.;

SIDLE, R. C.; STOKES, A. Tropical forest structure and understorey determine subsurface flow through biopores formed by plant roots. **CATENA**, 181, pp.104061 ff10.1016, 2019.

NUNES, D.; PINHEIRO, A.; DA SILVA, C.; PASSOS, L.; BROTTTO, J.; ABRÃO, M.; RODRIGUES, N.; MENDONÇA, M. A. Experiência de consolidação da Rede de Mutirões Agroecológicos em Viçosa-MG. **Revista Brasileira de Extensão Universitária**, v. 13, n. 3, p. 303-315, 5 dez. 2022.

OCHIAI, H.; NAKAMURA, S. **A função da Camada Serrapilheira no Controle da Erosão do Solo. In: Pesquisas em Conservação e Recuperação Ambiental no Oeste Paulista.** Instituto Florestal, São Paulo, 2004.

OLIVEIRA, A. C. C. **Sistemas agroflorestais com café: fixação e neutralização de carbono e outros serviços ecossistêmicos.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa – UFV, 141 p., 2013.

OLIVEIRA, L. N.; CORTIZO, G. F. M.; JUNQUEIRA, A. M. R.; PALERMO, A. C. Experiências ecopedagógicas em agricultura sintrópica com estudantes de graduação da Universidade de Brasília. **Cadernos de Agroecologia** –ISSN 2236-7934 -Anais do XII Congresso Brasileiro de Agroecologia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro -v. 19, n. 1, 2024

OLIVEIRA JÚNIOR, J. C.; DIAS, H. C. T. Precipitação efetiva em fragmento secundário da Mata Atlântica. **Rev. Árvore**, v. 29, pp. 9–15, 2005.

OLIVEIRA, L. A.; KAZAY, D. F. Sistemas agroflorestais e a provisão de serviços hidrológicos em Barra do Turvo (SP). **Agriculturas**, v. 12, n. 3, 2015.

ONG, C. K.; BLACK, C. R.; WILSON, J.; BAYALA, J.; JACKSON, N. A.; MUTHURI, C. W. Agroforestry: Hydrological Impacts. In: **Reference Module in Food Science.** Elsevier, 2017.

PEREIRA, A. R.; CASTRO, D. R. Agricultura sintrópica: manejo sustentável da Caatinga. **Revista Sertão Sustentável**, v. 6, n. 1, p. 39-59, 2024.

PRIMAVESI, A. M. **Manejo ecológico do solo.** 1ª ed. Editora Nobel. 552 p. 2002.

PULROLNIK, K. **Transformações do Carbono no Solo.** Embrapa Cerrados, Planaltina, DF. 1ª edição, 36p. 2009.

REBELLO, J. F. S.; SAKAMOTO, D. G. **Agricultura Sintrópica segundo Ernst Götsch.** 2ª ed. Edições Aguará. 175 p. 2022.

- SANTANA, F. C.; PEREIRA, A. J.; FERNANDES FILHO, E. I. Avaliação da velocidade de infiltração de água em sistema agroflorestal de café e eritrina. **Cadernos de Agroecologia** - ISSN 2236-7934 – Edição Especial V Simpósio Mineiro de Ciência do Solo: Agroecologia e a Compreensão do Solo como Fonte e Base para a Vida – Vol. 15, N° 1, Mar. 2020.
- SCHROTH, G.; HARVEY, C. A.; VINCENT, G. Complex Agroforests: Their Structure, Diversity, and Potential Role in Landscape Conservation. In: **Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes**, Ed. Island Press, p. 227-260, 2004.
- SILVA, M. B. P. S. *et al.* Agricultura sintrópica: uma breve revisão. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba, v. 6, n. 2, p. 1480-1489, abr./jun., 2023.
- SOUZA, H. N. *et al.* Selection of native trees for intercropping with coffee in the Atlantic Rainforest biome. **Agroforest Syst**, v. 80, p. 1-16, 2010.
- SPOHR, R. B.; CARLESSO, R.; GALLÁRRETA, C. G.; PRÉCHAC, F. G.; PETILLO, M. G. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p.74-81, 2009.
- STÖCKER, C. M.; BAMBERG, A. L.; STUMPF, L.; MONTEIRO, A. B.; CARDOSO, J. H.; LIMA, A. C. R. Short-term soil physical quality improvements promoted by an agroforestry system. **Agroforest Syst.**, 94:2053–2064, 2020.
- TISDAL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, 33, 141-163, 1982.
- TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4ª edição, 9ª reimpressão. Editora ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, Brasil. 1993.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 44:892-898, 1980.
- VOLTOLINI, L. C.; MERCADANTE, M. E. G.; RAMOS-FILHO, L. O.; MORICONI, W.; QUEIROGA, J. L. Uso da Água em Sistemas Agroflorestais: uma Breve Revisão da Literatura. **Cadernos de Agroecologia** – ISSN 2236-7934 – V. 13, N. 2, 2018.
- WANG, L.; ZHONG, C.; GAO, P.; XI, W.; ZHANG, S. Soil Infiltration Characteristics in Agroforestry Systems and Their Relationships with the Temporal Distribution of Rainfall on the Loess Plateau in China. **PLoS ONE** 10(4): e0124767. 2015.

WANG, Y.; ZHANG, B.; BANWART, S. A. Reduced Subsurface Lateral Flow in Agroforestry System Is Balanced by Increased Water Retention Capacity, in: **Advances in Agronomy**, v. 142, pp. 73–97, 2017. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.005>

WANG, Z.; WU, Y.; CAO, Q.; SHEN, Y.; ZHANG, B. Modeling the coupling processes of evapotranspiration and soil water balance in agroforestry systems. **Agricultural Water Management**, v. 250, 106839, 2021.

YOUNG, A. **Agroforestry for soil conservation**. CAB International. ICRAF - International Council for Research in Agroforestry. ISBN 0 85198 648 X. 1989.

SISTEMAS AGROFLORESTAIS SUCESSIONAIS COMO FERRAMENTA PARA CONSERVAÇÃO DE SOLO E ÁGUA NA ZONA DA MATA MINEIRA

Resumo

A degradação de terras é um problema global, que incide fortemente no Brasil, estimando-se que cerca de 22% das terras brasileiras estejam degradadas pela atividade agropecuária com uso de práticas ambientalmente inadequadas. O principal mecanismo físico pelo qual perde-se solo é denominado erosão hídrica, que consiste no desprendimento e arraste de partículas do solo, a partir do escoamento superficial da ação da água. Na Zona da Mata Mineira, o uso predominante do solo é com pastagens para produção de gado de corte e de leite, e estima-se que 60% das pastagens estejam degradadas, incorrendo em redução da qualidade do solo e da conservação de água inclusive em Áreas de Preservação Permanente. Neste contexto, os sistemas agroflorestais (SAFs) sucessionais surgem como alternativa para conciliar produção e conservação ambiental, com a otimização do espaço produtivo, provisão de serviços ecossistêmicos e da ciclagem de nutrientes a partir da combinação de espécies arbóreas com culturas de interesse econômico. O presente trabalho objetivou avaliar as propriedades relacionadas à física do solo e à retenção de água no solo em três SAFs em estágios sucessionais distintos e em uma área de pastagem de referência. Foram coletadas amostras indeformadas de solo das camadas de 0-5 e 5-10 cm nas linhas de plantio. Foram avaliadas as variáveis condutividade hidráulica saturada, densidade do solo, densidade de partícula, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, além do ajuste de curvas de retenção de água no solo, a partir da qual foram avaliadas as variáveis capacidade de campo, capacidade de água disponível, índice S e umidade de saturação. Os resultados foram submetidos a análise de variância e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade. Verificou-se maior capacidade de infiltração, maior porosidade e menor densidade do solo no sistema cronologicamente mais avançado no processo sucessional das agroflorestas, o que foi associado à maior presença de bioporos, que contribuem tanto para a absorção de água e nutrientes pelas culturas quanto para infiltração de água em camadas subsuperficiais do solo. Os resultados apontam para um estágio de degradação da pastagem de referência, o que reforça a ideia de implantação e manejo dos SAFs sucessionais como ferramenta para recuperação e conservação de solo e água na Zona da Mata Mineira. Nas agroflorestas mais avançadas, os resultados de condutividade hidráulica, porosidade e a curva de retenção indicam uma maior capacidade de

recarga subterrânea de água, sendo este um importante benefício ambiental. Nestes sistemas, a qualidade física do solo tende a melhorar com o tempo, assim como os benefícios promovidos pela biodiversidade construída no local.

1. Introdução

O ciclo de ocupação do território brasileiro, após a colonização, se desenvolveu através da conversão da cobertura vegetal natural do solo em extensas áreas de produção agrícola com somente uma espécie vegetal (monocultura), o que provocou profundas alterações nas características químicas, físicas e biológicas do solo (Bagyaraj e Stürmer, 2010). Atualmente, estima-se que cerca de 22% das terras brasileiras estejam degradadas, sendo a principal responsável por este cenário a atividade agropecuária, quase sempre estabelecida em regiões sem aptidão para tal atividade, e com o emprego de práticas ambientalmente inadequadas (Bai *et al.*, 2008). A perda de solo por erosão hídrica em território brasileiro é estimada em 616,5 Mg.ano⁻¹ em lavouras anuais, com custo de reposição de nutrientes da ordem de 1,3 bilhões de dólares por ano (Dechen *et al.*, 2015).

Na Zona da Mata Mineira, o uso predominante do solo é com pastagens para produção de gado de corte e de leite e estima-se que 60% das pastagens deste território estejam com algum grau de degradação (Hott *et al.*, 2023). Deste cenário incorre uma redução da qualidade do solo e, conseqüentemente, da conservação de água. Franco (2011) aponta que as pastagens são também o uso da terra predominante em Áreas de Preservação Permanente (APPs) na Zona da Mata Mineira, destacando a necessidade de propostas de sistemas agrícolas que conciliem preservação com a capacidade produtiva dos agricultores que nestas áreas habitam. A degradação de pastagens, após seu uso contínuo e prolongado, propicia um aumento da densidade do solo, principalmente na primeira camada do mesmo, afetando diretamente a absorção de água e nutrientes pelas plantas, assim como a infiltração da água para camadas subsuperficiais, resultando por fim, em maiores taxas de escoamento superficial e erosão (Müller *et al.*, 2004; Spohr *et al.*, 2009).

O adequado uso do solo previne erosão, controla inundações e o assoreamento dos rios, assim como abastece os lençóis freáticos que alimentam os cursos de água, garantindo o suprimento de água para as culturas, criações e comunidades humanas (EMBRAPA, 2012).

Neste contexto, os SAFs (ou simplesmente agroflorestas) surgem como uma alternativa que visa otimizar o espaço produtivo e a ciclagem de nutrientes a partir da combinação de espécies arbóreas com as culturas de principal interesse (Altieri, 2012). Apresentam grande potencial para redução da perda de solo (Franco *et al.*, 2002) e para melhoria progressiva das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (Stöcker *et al.*, 2020; Teixeira *et al.*, 2021). Destaca-se, ainda, a implantação de SAFs como estratégia de redução da vulnerabilidade dos sistemas agrícolas às mudanças climáticas (IPCC, 2019), assim como ferramenta para manutenção da biodiversidade (Schroth *et al.*, 2004).

Estudos em áreas de agroflorestas mostram o impacto da prática na melhoria da qualidade física do solo, em especial na redução da densidade do solo, no aumento da porosidade total e na capacidade de infiltração (Stöcker *et al.*, 2020; Loaiza Puerta *et al.*, 2018; Carvalho *et al.*, 2004; Franco *et al.*, 2002). Estas melhorias são associadas geralmente ao acréscimo no teor de matéria orgânica do solo (Pulrolnik, 2009; Tisdall e Oades, 1982) e também à presença de bioporos, que criam canais preferenciais para infiltração de água, circulação de gases, bem como para o alongamento de raízes, facilitando assim a absorção de água e nutrientes pelas culturas (Blagodatsky e Smith, 2012; Kautz, 2014; Idris e Mahrup, 2015; Nespoulous *et al.*, 2019).

A melhora da qualidade física do solo contribui diretamente para a regulação de parte do ciclo hidrológico no sítio produtivo a partir da maior infiltração e manutenção de água no solo (Loaiza Puerta *et al.*, 2018). Em áreas de agrofloresta, estudos já mostram o impacto da do manejo agroflorestal na produção de água na propriedade (Oliveira e Kazay, 2015), na maior eficiência de uso da água no solo (Ong *et al.*, 2017; Muñoz-Villers *et al.*, 2020) e na proteção de nascentes (Miccolis *et al.*, 2016).

Avançando na concepção de implantação e manejo de agroflorestas, foi cunhado pelo suíço Ernst Götsch o termo “Agricultura Sintrópica” no qual preconiza-se que os sistemas agroflorestais apresentem maior riqueza de espécies, maior adensamento de plantas, estratificação e intensa ciclagem de material orgânico, tendo na poda dos componentes arbóreos sua principal ferramenta de manejo. Na Agricultura Sintrópica (AS), as podas possuem uma importante finalidade de estimular o crescimento das plantas, através de uma refinada relação existente entre estas e microorganismos presentes no solo, além de aportar material orgânico ao solo. Este material serve de cobertura morta, melhorando o controle da vegetação espontânea, a retenção de água no solo e promoção de benefícios a médio e longo prazo como a ciclagem de nutrientes e a melhora da qualidade química, biológica e física do solo (Young, 1989;

Jackson *et al.*, 1998; Rabello e Sakamoto, 2022). Outras práticas frequentemente adotadas no manejo da AS são o plantio de consórcios, a capina seletiva, a cobertura abundante do solo com material orgânico (*mulching*) e o gerenciamento do sistema para continuamente se ter plantas ocupando os vários estratos de altura possíveis (Rebello e Sakamoto, 2022).

Na Zona da Mata Mineira, as práticas de agrofloresta são voltadas principalmente (mas não restritas) para a cafeicultura, onde a presença de árvores proporciona sombra e regulação térmica para o cafeeiro, aporte de material orgânico ao solo, além de representar fonte alternativa de renda, sem grande aumento de mão-de-obra (Souza *et al.*, 2010; Carvalho *et al.*, 2005). Ainda, um critério mencionado pelos(as) agricultores(as) dessa região, é a presença de raízes superficiais, que podem vir a competir por água e nutrientes com o cafeeiro. Oliveira (2013), estudando a composição de SAFs com café na Zona da Mata elencou 6 funções distintas para as árvores: adubação/cobertura do solo, alimentar/medicinal, produção de madeira, interação direta com fauna, sombra e beleza cênica.

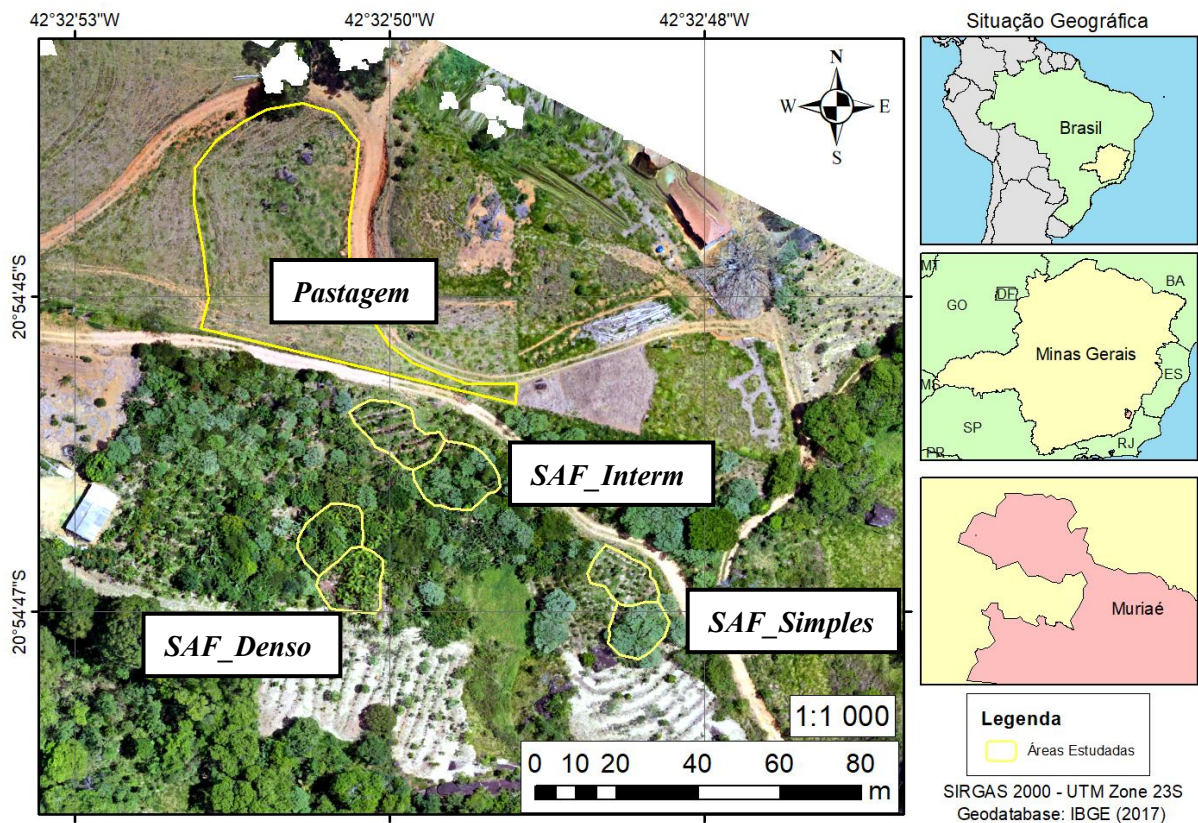
Diante deste cenário, o presente trabalho objetivou avaliar as propriedades relacionadas à física do solo e à retenção de água no solo em três SAFs com café em estágios sucessionais distintos, em uma propriedade localizada na Zona da Mata Mineira. Como referência, foram realizadas as mesmas análises em uma área de pastagem, adjacente às áreas de agrofloresta, representando o uso do solo praticado anteriormente à implantação dos SAFs na propriedade.

2. Material e Métodos

2.1. Caracterização da Área de Estudo

O estudo foi conduzido no Sítio Jardim da Irmandade, localizado na fronteira sul do Parque Estadual Serra do Brigadeiro, na comunidade da Graminha, município de Muriaé, na Zona da Mata Mineira (20°54'45"S, 42°32'53"O). A altitude média é de 1000 metros. O clima predominante da região é o Temperado Chuvoso (mesotérmico) – Cwb, também chamado de subtropical de altitude, caracterizado por verões chuvosos e invernos de 4 a 5 meses secos (PROPEDAF, 2002). A temperatura média anual é de 18 °C e uma precipitação média anual de 1300 mm (BirdLife International, 2024). Um mapa de localização da propriedade é apresentado na Figura 1.

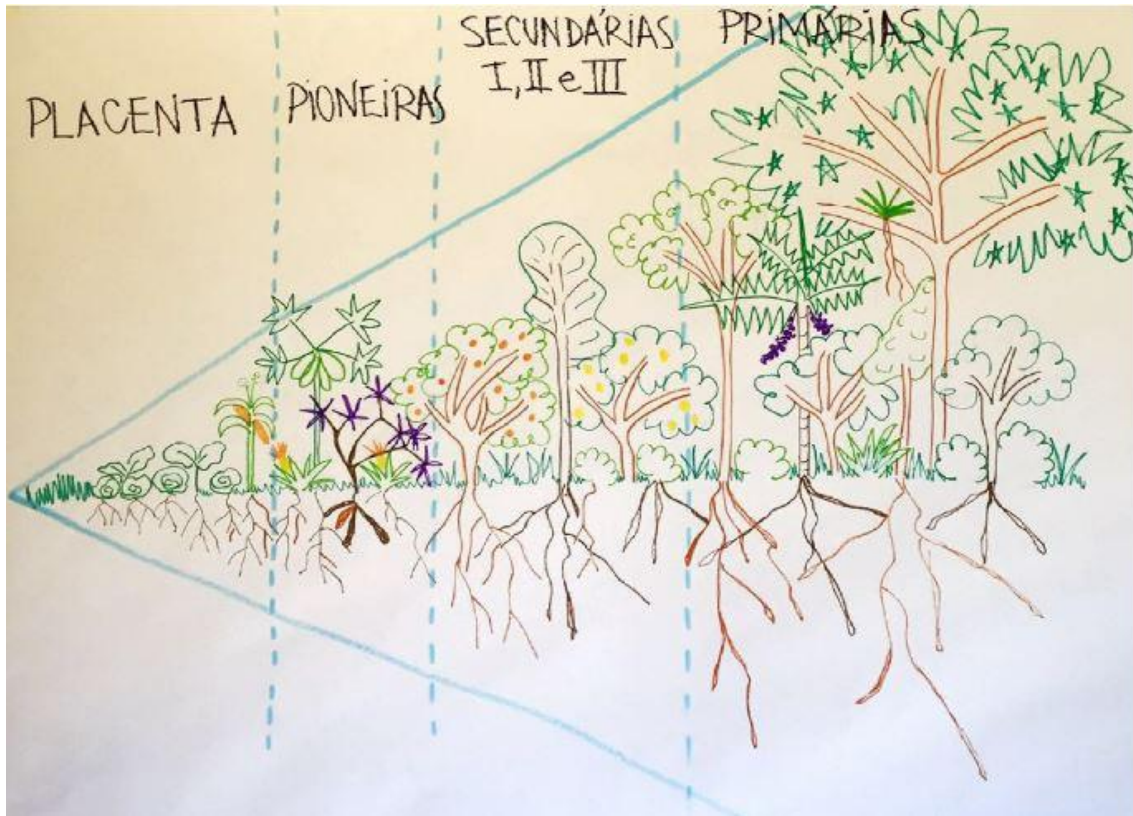
Figura 1: Localização da área de estudo



As áreas de agroflorestas tem sido implementadas na propriedade desde 2016, com foco principal na produção de café (*Coffea arabica*) e juçara (*Euterpe edulis*). Foram selecionadas três áreas distintas, contíguas, representativas do processo sucessional de evolução dos sistemas agroflorestais da propriedade. A diferença entre as três áreas não deve ser entendida simplesmente pelas idades distintas, ou mesmo pela densidade de plantio distintas, mas sim pelos seus diferentes estágios sucessionais. Na AS os sistemas evoluem em complexidade, densidade e estratificação, ganhando, com o tempo, características de ecossistemas clímax – ou sistemas de abundância (Rabello e Sakamoto, 2022). As áreas, denominadas *SAF_Simples*, *SAF_Interm* e *SAF_Denso*, estão, na verdade, em estágios sucessionais diferentes (crescentes). Foram implantadas no anos de 2019, 2018 e 2016, respectivamente. Foi estudada também a área de pasto, vizinha à propriedade, como referência para o uso do solo no período que antecede a implantação dos SAFs e também como uso mais frequente na região. Conforme pode ser observado, as áreas de estudo são contíguas, apresentando pouca diferença no que concerne ao tipo de solo, declividade, face de exposição/orientação e posição na paisagem. Sendo assim, o uso do solo, refletido nas características de cada SAF, representa então a única

variável entre as áreas, o que é sugerido por Bruijnzeel (2004) para estudos de comparação entre dinâmicas hídricas em diferentes usos do solo. Um esquema ilustrativo do processo sucessional em sistemas agroflorestais é apresentado na Figura 2.

Figura 2: Esquema ilustrativo do processo sucessional em agroflorestas



Fonte: Fazenda da Toca (2024).

Como forma de caracterização da composição vegetal das áreas, foi realizada um inventário das espécies presentes, a aferição do Comprimento a Altura do Peito (CAP) de cada indivíduo, uma estimativa de densidade de plantio e a medição da área total. Ainda, visando a caracterização química e textural do solo das áreas de estudo, foram coletadas amostras compostas (10 amostras simples para cada amostra composta) de solo das camadas 0-10 cm e 10-20 cm para análise de rotina conforme Embrapa (2017). As análises foram realizadas no Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante do Departamento de Solos (DPS) da UFV.

2.2. Amostragem do solo e análises físicas

Amostras indeformadas de solo foram tomadas aleatoriamente nas linhas de plantio no três SAFs e na área de pastagem, resguardada a distância de 0,30 m entre as plantas de café e/ou

árvores. Na área de pastagem, as amostras foram obtidas em locais aleatórios. Em cada área, foram analisadas as camadas de 0-5 cm e de 5-10 cm. A escolha pelas camadas superficiais se deu por conta da idade das áreas estudadas e por serem as camadas mais impactadas pelo manejo do solo realizado (Stöcker *et al.*, 2020; Müller *et al.*, 2004). Para cada conjunto área x profundidade foram tomadas 6 amostras aleatórias. Ao todo, foram tomadas 48 amostras (6 amostras x 4 áreas x 2 profundidades). Para coleta das amostras foram usados anéis volumétricos de 50 mm de diâmetro por 50 mm de altura e trado tipo Uhland.

As amostras foram cuidadosamente coletadas e transportadas para análise no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos (DPS) da UFV, sem que fossem afetadas as estruturas dos solos. Essas amostras foram utilizadas para determinação da condutividade hidráulica saturada (K_s), densidade do solo (D_s), densidade de partícula (D_p), porosidade total (PT), macroporosidade (MaP) e microporosidade (MiP), seguindo as metodologias de Embrapa (2017). Além destas análises, as curvas de retenção de água no solo foram ajustadas ao modelo de van Genuchten (1980). A partir destas foram calculados o índice S (Dexter, 2004; Maia, 2011), a capacidades de campo (CC), o ponto de murcha permanente (PMP) e a capacidade de água disponível (CAD). As metodologias específicas de cada análise são descritas a seguir.

➤ Condutividade hidráulica saturada (K_s)

Análise realizada com carga hidráulica constante de 2 cm sobre uma amostra indeformada de solo previamente saturada (Libardi, 2018). Calculada pela equação:

$$K_s = \frac{-q}{i}$$

Onde q é a o fluxo (cm/s) e i , o gradiente hidráulico (cm/cm).

➤ Densidade do solo (D_s)

Calculada com amostra indeformada de solo, seca a 100-105°C em estufa por 48h, pela equação:

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V}$$

Onde M_{ss} é a massa de solo seco (em gramas) e V , o volume do anel (em cm^3).

➤ Densidade de partícula (D_p)

Calculada com a amostra previamente deformada e seca em estufa a 100-105 °C por 48h, a partir da equação:

$$D_p = \frac{M_{ss}}{V_{ss}}$$

Onde M_{ss} é a massa de solo seco (g) e V_{ss} , o volume de solo seco (em cm^3) obtido a partir de balão volumétrico preenchido com álcool até um volume conhecido.

➤ Porosidade Total (PT)

Calculada pela equação:

$$PT = 1 - \frac{D_s}{D_p}$$

➤ Macroporosidade (MaP)

Calculada pela equação:

$$MaP = PT - MiP$$

➤ Microporosidade (MiP)

Correspondente à umidade volumétrica sob tensão de -6 kPa.

➤ Curva de retenção de água no solo (CRA)

A curva de retenção de água no solo foi elaborada com medições de umidade correspondentes às tensões de -2 kPa, -4 kPa, -6 kPa, -8 kPa, -10 kPa, -100 kPa, -500 kPa e -1500 kPa e foi ajustada pela equação de van Genuchten (1980) através do Método dos Mínimos Quadrados, com auxílio da ferramenta *Solver* da planilha eletrônica *Excel*. A equação de van Genuchten é apresentada a seguir.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m}$$

Foi adotada a restrição $m = 1 - \frac{1}{n}$, proposta por van Genuchten (1980).

➤ Índice S

O Índice S proposto por Dexter (2004) é inclinação da reta tangente à curva de retenção de água no solo no seu ponto de inflexão. Foi obtida a partir da equação derivada por Maia (2011), apresentada a seguir:

$$\frac{d\theta}{dh} = \frac{-mn\alpha^n(\theta_s - \theta_r)h^{n-1}}{[1 + (\alpha h)^n]^{m+1}}$$

Calculada no ponto $h = \frac{m^{1/n}}{\alpha}$

➤ Capacidade de campo (CC)

Definida, para solos de textura média, pela umidade correspondente à tensão de -10 kPa, obtida da curva de retenção de água no solo (Rezende, 2016; Brito *et al.*, 2011; Carvalho, 2011).

➤ Ponto de murcha permanente (PMP)

Definido pela umidade correspondente à tensão de -1500 kPa, obtida da curva de retenção de água no solo (Cassel e Nielsen, 1986).

➤ Capacidade de água disponível (CAD)

Calculada pela equação (Cassel e Nielsen, 1986):

$$CAD = CC - PMP$$

Ainda, visando a definição de CC e PMP da camada subsuperficial (80 cm), foi obtida a Ds e feita a CRA. Para tal, foram coletadas 5 amostras nas áreas de agrofloresta, durante abertura de trincheira para instalação dos sensores de umidade (Capítulo 2 da dissertação). Os resultados obtidos em umidade gravimétrica (θ_g) foram convertidos para umidade volumétrica (θ_v) a partir da equação (Libardi, 2010):

$$\theta_v = Ds \times \theta_g$$

2.3. Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância (ANOVA). Quando os resultados da ANOVA apresentaram resultado significativo pelo teste F, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, com nível de significância de 10% ($p < 0,10$). A escolha pelo nível de significância de 10% se deu pela alta variação de resultados em análises de física do solo (Grego e Vieira, 2005). A área de pastagem, uso do solo de referência na região, foi incluído nas análises estatísticas. As análises foram realizadas através da linguagem computacional R (R Core Team, 2024), com uso dos pacotes “*multcompView*” (Graves *et al.*, 2024) e “*dplyr*” (Wickham *et al.*, 2023).

3. Resultados e Discussão

3.1. Caracterização da Área de Estudo

Os resultados das análises de rotina são apresentados na Tabela 1. Destaca-se, principalmente, os maiores teores de P, K, Ca^{2+} , Mg^{2+} nas áreas de agrofloresta, decorrente do manejo realizado na propriedade. Além desta, na Tabela 2 são apresentadas as análises texturais, onde nota-se o domínio de solos franco-argilo-arenosos.

Tabela 1: Fertilidade química do solo nas áreas de SAFs e de pastagem

Área	Camada	pH	P	K	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H+Al	SB	(t)	(T)	V	m	P-Rem
		(H_2O)	(mg/dm^3)	(cmol/dm ³)						(%)		(mg/dm^3)		
SAFs	0 - 10	5,05	5	69	3,36	1,11	0,16	7,6	4,65	4,81	12,25	38	3,3	19,9
	10 - 20	5,18	31,7	50	2,72	0,74	0,08	6,4	3,59	3,67	9,99	35,9	2,2	17
Pastagem	0 - 10	5,28	0,6	46	1,07	0,58	0,26	6,4	1,77	2,03	8,17	21,7	12,8	19,5
	10 - 20	5,31	0,3	35	0,89	0,41	0,14	5,5	1,39	1,53	6,89	20,2	9,2	20,1

Tabela 2: Análise textural do solo nas áreas de SAFs e de pastagem

Área	Camada	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Classe textural
SAFs	0 – 10 cm	45%	11%	21%	23%	Franco-argilo-arenosa
	10 – 20 cm	38%	12%	23%	27%	Franco-argilo-arenosa
Pastagem	0 – 10 cm	43%	11%	21%	24%	Franco-argilo-arenosa
	10 – 20 cm	38%	12%	20%	29%	Franco-argilo-arenosa

Os resultados da caracterização da área de estudo, a partir do inventário e dos parâmetros alométricos avaliados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Caracterização arbórea das áreas de estudo

Área	Espécie (nome popular)	Espécie (nome científico)	Nº de indivíduos	CAP médio (cm)	DAP médio (cm)
SAF_Simples	Capoeira-branca	<i>Solanum mauritianum</i>	18	31,5	10,0
	Araçá	<i>Psidium cattleianum</i>	1	8,0	2,5
	Tamboril	<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	1	4,5	1,4
SAF_Interm	Abacateiro	<i>Persea americana</i>	4	14,5	4,6
	Araçá	<i>Psidium cattleianum</i>	2	7,5	2,4
	Araucária	<i>Araucaria angustifolia</i>	1	17,0	5,4
	Bananeira	<i>Musa spp.</i>	3	44,7	14,2
	Capoeira-branca	<i>Solanum mauritianum</i>	17	36,7	11,7
	Guapuruvu	<i>Schizolobium parahyba</i>	7	32,1	10,2

Área	Espécie (nome popular)	Espécie (nome científico)	Nº de indivíduos	CAP médio (cm)	DAP médio (cm)
	Juçara	<i>Euterpe edulis</i>	2	26,5	8,4
	Mamoeiro	<i>Carica papaya</i>	3	14,0	4,5
	Pau-balsa	<i>Ochroma pyramidale</i>	2	34,0	10,8
	Tamboril	<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	7	32,4	10,3
	Abacateiro	<i>Persea americana</i>	7	30,1	9,6
	Amoreira	<i>Morus nigra</i>	1	21,0	6,7
	Araucária	<i>Araucaria angustifolia</i>	2	22,5	7,2
	Assa-Peixe	<i>Vernonia polysphaera</i>	2	16,5	5,3
	Cacaueiro	<i>Theobroma cacao</i>	9	6,8	2,2
	Capoeira-branca	<i>Solanum mauritianum</i>	3	30,3	9,7
SAF_Denso	Castanha do Maranhão	<i>Pachira glabra</i>	2	19,0	6,0
	Citrus	<i>Citrus spp.</i>	1	4,5	1,4
	Guapuruvu	<i>Schizolobium parahyba</i>	3	24,0	7,6
	Ingá	<i>Inga spp.</i>	6	3,8	1,2
	Juçara	<i>Euterpe edulis</i>	37	31,0	9,9
	Pitangueira	<i>Eugenia uniflora</i>	2	6,5	2,1

Área	Espécie (nome popular)	Espécie (nome científico)	Nº de indivíduos	CAP médio (cm)	DAP médio (cm)
	Tamboril	<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	2	14,0	4,5

Um total de 20 indivíduos arbóreos, divididos em 3 espécies, foi amostrado na área do *SAF_Simples*, com ampla predominância (90%) da capoeira-branca (*Solanum mauritianum*) utilizada para sombreamento do café (*Coffea arabica*). Uma planta de goiabeira (*Psidium guajava*) e uma de tamboril (*Enterolobium contortisiliquum*) foram encontradas também, tendo brotados espontaneamente durante a implantação do sistema, segundo relato do agricultor.

A capoeira-branca (*Solanum mauritianum*) é uma espécie considerada de fácil manejo, pela sua madeira macia e pela sua rápida capacidade de rebrota, sendo uma fonte importante de produção de biomassa em SAFs na Zona da Mata Mineira (Oliveira, 2013). Além desta característica, é uma planta nativa bem adaptada à região, que cresce espontaneamente na propriedade – característica desejada pelos agricultores devido a não necessidade de aquisição ou produção de mudas (Carvalho *et al.*, 2005). A escolha do agricultor por esse sistema mais simples foi de criar condições iniciais de sombra e de aporte de material orgânico no solo para o estabelecimento posterior de outras culturas, principalmente a palmeira juçara (*Euterpe edulis*), um dos focos de produção da propriedade.

No *SAF_Interm* foi amostrado um total de 48 indivíduos arbóreos divididos em 10 espécies diferentes, com predomínio da capoeira-branca (*Solanum mauritianum*) (35%), mas também forte presença de indivíduos de guapuruvu (*Schizolobium parahyba*) (14%) e tamboril (*Enterolobium contortisiliquum*) (14%). Estas espécies – que somam mais da metade dos indivíduos arbóreos amostrados –, novamente, são consideradas de fácil manejo (Carvalho *et al.*, 2005), pela rápida capacidade de rebrota, sendo importante fontes de produção de biomassa (Souza *et al.*, 2010). Por essas características, são espécies consideradas “chave” para o processo de aporte contínuo de material vegetal ao solo e para o estabelecimento posterior de outras espécies, de maior interesse econômico (Rebello e Sakamoto, 2022).

Além destas, destaca-se a presença de árvores frutíferas e de produção de madeira como o abacateiro (*Persea americana*), araçazeiro (*Psidium cattleianum*), araucária (*Araucaria angustifolia*), bananeira (*Musa spp.*), juçara (*Euterpe edulis*), mamoeiro (*Carica*

papaya) e pau balsa (*Ochroma pyramidale*). Estas árvores, embora possuam a finalidade principal de produção para a família, também estão sujeitas a podas (menos frequentes e menos drásticas). O abacateiro, especificamente, é uma das principais espécies apontadas na sistematização feita por Carvalho *et al.* (2005), por não competir com o café e produzir frutas que atendem tanto ao mercado quanto a múltiplos usos das famílias (consumo in natura, óleo, produção de sabão e mudas). Junto com a bananeira, são espécies presentes na maioria dos SAFs da Zona da Mata Mineira (Oliveira, 2013; Carvalho *et al.*, 2005).

No *SAF_Denso* foi amostrado um total de 77 indivíduos arbóreos divididos em 13 espécies diferentes, com amplo predomínio (47%) da palmeira juçara (*Euterpe edulis*). Neste sistema, a principal produção já não é mais o café - que ocupa o estrato baixo -, mas a própria juçara, que ocupa o estrato alto/emergente, quase fechando o dossel do talhão. Esta palmeira é uma das espécies que sofreu com a exploração e o desmatamento da Mata Atlântica, estando incluída na Lista Oficial das Espécies da Flora Brasileira Ameaçadas de Extinção. Sua ocorrência se dá em com maior grau de umidade do solo (Incaper, 2017).

Além da juçara, nesta área encontram-se plantas com múltiplas funções, principalmente a produção de frutos e de biomassa, como o cacaueteiro (*Theobroma cacao*) (12%), o abacateiro (*Persea americana*) (9%), o ingá (8%), a banana (*Musa spp.*) (5%), e algumas plantas que o agricultor tem testado em locais mais sombreados, como a castanhas do maranhão (*Pachira glabra*) e a amora (*Morus nigra*).

Nota-se, então, como as áreas evoluem não somente em idade e densidade de plantio, mas também – e principalmente – em complexidade, estratificação e multiplicidade de funções econômicas e ecológicas. Estes fatores podem ser atribuídos a uma evolução no estágio sucessional das áreas, característica típica da AS (Rabello e Sakamoto, 2022), que vai influenciar, inclusive, na cultura principal da área, como visto no caso do *SAF_Denso*, em que a cultura principal mudou, com o tempo, do café para a palmeira-juçara.

A complexidade – e conseqüentemente as funções – das espécies encontradas na propriedade vão de acordo com Nonato (2006), que estudou SAFs com café na Zona da Mata Mineira e classificou as espécies 3 níveis de estratificação e função: um estrato arbóreo extremamente diversificado, um estrato arbustivo com foco econômico (geralmente o café, mas não somente ele) e um estrato herbáceo, presente principalmente em área ainda pouco sombreadas, para produção interna da família como feijões, hortaliças e plantas medicinais. A facilidade de poda

é um dos critérios elegidos pelos agricultores para a escolha das árvores que vão compor os SAFs com café (Carvalho *et al.*, 2005; Nonato, 2006; Souza *et al.*, 2010; Oliveira, 2013).

O aporte frequente de material vegetal ao solo, seja pelas podas ou por fatores naturais, é um dos principais responsáveis pela ciclagem de nutrientes, que torna os SAFs adequados para os agroecossistemas tropicais. Possibilita, a partir principalmente do manejo, a multiestratificação dos sistemas agrícolas, reduzindo competição e otimizando produção de diferentes componentes vegetais numa mesma área (Gama-Rodrigues, 2004). Pode ser entendido, sob uma outra ótica, como uma estratégia da própria natureza para fortalecimento dos seus sistemas naturais, a partir do aumento da biodiversidade e da manutenção de níveis elevados de nutrientes no solo a partir da ciclagem (Yana e Weinert, 2001).

Por fim, destaca-se ainda a grande riqueza de espécies em áreas consideradas pequenas, típico dos SAFs da Zona da Mata Mineira (Oliveira, 2013; Souza *et al.*, 2010; Nonato, 2006; Carvalho *et al.*, 2005). Essa é outra característica dos SAFs sucessionais, em que se preza não somente pelo grande volume de material vegetal depositado no solo, mas também pela sua diversidade (Rabello e Sakamoto, 2022). A riqueza de espécies numa área, que vai representar a diversidade do material vegetal que é aportado ao solo, influencia positivamente na taxa de decomposição da serrapilheira pela microbiologia do solo, conforme estudado por Oliveira *et al.* (2019) em uma área de floresta tropical no Paraná. Esta influência é mais pronunciada nas primeiras fases de decomposição da serrapilheira e pode ser determinante para a otimização do armazenamento de carbono pelo solo (Zhou *et al.*, 2024). Ainda, em áreas mais estratificadas, onde há menor incidência de radiação solar direta ao solo, tende-se a se conservar maior umidade no ambiente (Monteith *et al.*, 1991), o que vai impactar diretamente na taxa de decomposição da serrapilheira (Chen *et al.*, 2024).

3.2. Análises da física do solo

Os resultados das análises físicas do solo para as camadas 0-5 cm e 5-10 cm são apresentados na Tabela 4. Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey com nível de significância de 10% ($p < 0,10$). A ausência de letras indica diferenças não significativas.

Tabela 4: Comparação entre os resultados de Ks, Ds, Dp, PT, MiP e MaP pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade

Camada	Área	Ks (cm/min)	Ds (g/cm ³)	Dp (g/cm ³)	PT (%)	MiP (%)	MaP (%)
0-5 cm	<i>SAF_Denso</i>	3,45 ± 1,45 a	1,01 ± 0,11 a	2,29 ± 0,13 a	56,0 ± 3,7 a	34,2 ± 4,5	21,8 ± 7,3 a
	<i>SAF_Interm</i>	2,14 ± 1,52 ab	1,11 ± 0,07 ab	2,38 ± 0,07 a	53,4 ± 4,0 ab	35,7 ± 4,8	17,8 ± 6,9 a
	<i>SAF_Simples</i>	0,80 ± 0,55 bc	1,17 ± 0,1 b	2,39 ± 0,10 a	50,9 ± 3,1 b	37,2 ± 4,7	13,7 ± 6,7a
	<i>Pastagem</i>	0,15 ± 0,17 c	1,47 ± 0,05 c	2,54 ± 0,05 b	42,1 ± 2,2 c	37,7 ± 2,1	4,4 ± 4,0 b
5-10 cm	<i>SAF_Denso</i>	1,32 ± 0,91 a	1,17 ± 0,07 a	2,51 ± 0,03	53,3 ± 3,1	31,5 ± 2,2 a	21,8 ± 2,3 a
	<i>SAF_Interm</i>	0,59 ± 0,41 ab	1,21 ± 0,17 ab	2,52 ± 0,07	51,9 ± 7,4	33,0 ± 4,1 ab	18,9 ± 10,7 ab
	<i>SAF_Simples</i>	0,49 ± 0,4 b	1,26 ± 0,05 ab	2,56 ± 0,06	50,9 ± 2,4	34,6 ± 1,3 ab	16,2 ± 3,4 ab
	<i>Pastagem</i>	0,31 ± 0,19 b	1,34 ± 0,06 b	2,58 ± 0,06	47,9 ± 1,8	35,9 ± 1,3 b	12,0 ± 2,7 b

Ks: condutividade hidráulica saturada; Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partícula; PT: porosidade total; MiP: microporosidade; MaP: macroporosidade

Os resultados mostram uma melhoria evidente de algumas propriedades físicas do solo após a implantação dos SAFs sucessionais na área de estudo. As propriedades Ks, Ds, Dp, PT e MaP tiveram melhora significativa na camada de 0-5 cm. E, na camada de 5-10 cm, foi observado variação em Ks, Ds, MiP e MaP.

A condutividade hidráulica saturada (Ks) expressa a facilidade com que a água se movimenta no solo, sendo importante, então, tanto para a conservação de solo e água, quanto para a produção das culturas, pois aumenta a entrada de água no solo e reduz o fluxo de escoamento superficial, que é responsável pela erosão (Bertoni e Lombardi Neto, 1990). Está associada diretamente ao sistema poroso do solo, atestando indiretamente sobre a quantidade, o tamanho, a morfologia e a continuidade dos poros (Gonçalves e Libardi, 2013). Por esse motivo, é altamente relacionada à macroporosidade (MaP) e à densidade do solo (Ds), além de ser sensivelmente influenciada pelo manejo de solo praticado (Silva e Kato, 1997). No presente trabalho, foi possível visualizar diferenças significativas ($p < 0,10$) progressivas entre os valores de Ks para as 4 áreas. Na primeira camada (0-5 cm) houve maior diferença, refletindo de forma didática o caráter progressivo da melhoria do solo a partir do manejo agroflorestal, o que também é mostrado no trabalho de Stöcker *et al.* (2020). Na segunda camada (5-10 cm), houve diferença significativa apenas entre o *SAF_Denso* e as áreas do *SAF_Simples* e de pastagem. Esse resultado corrobora com o observado na camada de 0-5 cm, pois os extremos, representados pelo *SAF_Denso* e o *SAF_Simples*, apresentam diferença significativa, enquanto os valores observados no *SAF_Interm* não se diferenciam do *SAF_Denso*. Isso pode indicar que o processo de alteração desta propriedade já vem ocorrendo de forma mais pronunciada, aproximando o status dessa propriedade física do solo entre as agroflorestas sucessionalmente

mais desenvolvidas. Espera-se, com o passar do tempo e com o avanço do processo sucessional das áreas, que estas diferenças também se pronunciem nas camadas mais inferiores.

A melhora da capacidade de infiltração sob manejo agroflorestal é observada em diversos estudos (Dahiya *et al.*, 2022; Stöcker *et al.*, 2020; Loaiza Puerta *et al.*, 2018; Carvalho *et al.*, 2004; Franco *et al.*, 2002). É normalmente atribuída ao processo de formação de bioporos e ao aumento do teor de carbono no solo. O aumento do teor de carbono no solo contribui para formação e estabilização de agregados do solo (Pulrolnik, 2009; Tisdall e Oades, 1982). Os bioporos são formados pela macrofauna do solo e pelos sistemas radiculares das plantas. Criam canais preferenciais de infiltração que elevam significativamente a capacidade de infiltração do solo (Siriri *et al.*, 2006; Smettem e Collis-George, 1985), contribuindo para maior recarga subterrânea (Alvarenga *et al.*, 2012). Além de contribuir para maior infiltração de água nas camadas subsuperficiais do solo, os bioporos criam caminhos preferenciais para alongamento de raízes e aquisição de nutrientes pelas plantas (Kautz, 2014). Adicionalmente aos efeitos produzidos sob a superfície do solo, é típico dos SAFs sucessionais a manutenção de uma camada robusta de serrapilheira sobre as linhas de plantio. O volume de serrapilheira apresenta correlação exponencial negativa com o potencial erosivo (Ochiai e Nakamura, 2004). Nas áreas estudadas, a espessura da camada de serrapilheira, embora não tenha sido quantificada, foi visivelmente superior no *SAF_Denso* com relação ao *SAF_Interm* - e virtualmente ausente no *SAF_Simples* e na pastagem - confirmando a tendência observada por Dunkerley (2003).

Os resultados de D_s e PT seguem a mesma tendência de K_s , o que já era esperado devido à alta correlação entre estas variáveis (Gonçalves e Libardi, 2013), e seguem os resultados obtidos por Matos *et al.* (2022) e Cherubin *et al.* (2018), que mostram que diferentes arranjos de agrofloresta foram capazes de reduzir a densidade do solo em uma área originalmente ocupada com pastagem, tornando os SAFs ferramentas aptas para a conservação e mesmo para a reversão de processos de degradação do solo. A área de pastagem foi a única a apresentar valores de D_s superiores a $1,30 \text{ g/cm}^3$, considerado como um valor limite para o adequado estabelecimento da maioria das culturas (Embrapa, 2003), sugerindo a ocorrência de um processo de degradação da qualidade física do solo na pastagem estudada.

Os resultados de MaP para ambas as camadas (0-5 cm e 5-10 cm), que estariam associados diretamente a K_s e D_s , não mostram a nível significativo uma gradação entre os SAFs estudados, apenas a diferença deles com a área de referência (pastagem). Com isso, reforça a ideia de que as a implantação e o manejo de agroflorestas possuem a capacidade de elevar a

porosidade e reduzir a densidade do solo, contribuindo diretamente para a conservação de solo e água na Zona da Mata Mineira (Franco, 2011). Ainda, podem indicar o processo de degradação da pastagem decorrente do pastoreio em si, que tende, com o tempo, em reduzir a macroporosidade das camadas mais superficiais do solo (Tarrá *et al.*, 2010; Primavesi, 2002). Na primeira camada (0-5 cm), o resultado para a área de pastagem foi inferior a 10%, valor considerado limite para adequada aeração do solo (Hakansson e Lipiec, 2000). Nas áreas de agrofloresta, o efeito é o oposto, no sentido da regeneração e melhora da qualidade física do solo.

Os resultados de MiP não mostram diferenças significativas para a primeira camada (0-5 cm). Na segunda (5-10 cm), há diferença entre o *SAF_Denso* e a pastagem, o que pode ser atribuído ao aumento da macroporosidade promovido pelo manejo agroflorestal. A mesma tendência foi observada por Silva *et al.* (2020) e Marcatto e Silveira (2017), estando associada à redução da densidade do solo.

Os resultados apresentados fortalecem a ideia de que as propriedades físicas do solo melhoram com o tempo no manejo da sistemas agroflorestais sucessionais, o que é anunciado por Rebello e Sakamoto (2022) e mostrado também no trabalho de Stöcker *et al.* (2020). Neste último, avaliando a física do solo em agroflorestas em áreas de argissolo no Rio Grande do Sul, foram encontradas diferenças significativas até a camada de 10-20 cm, em SAFs com 7 anos de idade. Para camadas abaixo de 20 cm não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas.

Pelo lado da produção das culturas, as variáveis densidade do solo (Ds) e porosidade total (PT) influenciam diretamente no crescimento radicular das plantas e, conseqüentemente, na sua capacidade de absorver água e nutrientes (Medeiros *et al.*, 2005), podendo estimular ou mesmo inibir o desenvolvimento das plantas (Meurer, 2007). Segundo Medeiros *et al.* (2005), a maior absorção de nutrientes em solos menos compactados está mais relacionada à disponibilidade de água (por fluxo de massa) nestes solos do que à compactação em si, o que reforça a ideia da AS – e os preceitos da Agroecologia de forma ampla – de que são necessários modelos de produção que conciliem produção com conservação ambiental (Rebello e Sakamoto, 2022; Altieri, 2012). Outros estudos, como os de Ribeiro *et al.* (2010), Reinert *et al.* (2008) e Silva *et al.* (2010), mostram o impacto da densidade do solo no crescimento radicular e vegetativo de diferentes espécies.

Por fim, destaca-se o resultado de D_p , no qual foram visualizadas diferenças significativas na primeira camada (0-5 cm) entre as áreas de agrofloresta e a área de pastagem. Ou seja, apesar da proximidade geográfica, da mesma posição na paisagem e se tratar da mesma classe de solo, a pastagem apresenta uma densidade de partícula mais alta do que as áreas de agrofloresta, o que associa diretamente o manejo realizado nas áreas com as suas respectivas texturas de solo, reforçando os resultados de Eguchi *et al.* (2002). Estes autores mostram que a variabilidade espacial da densidade de partícula pode ser atribuída ao manejo de solo praticado. Tal resultado pode estar associado ao acréscimo no teor de matéria orgânica do solo, como visto no trabalho de Nabayi *et al.* (2021) e nas modelagens de Schjønning *et al.* (2017) e Ruehlmann (2020). Por este mesmo motivo, D_p tende a aumentar conforme a profundidade do solo (Brady e Weil, 2002; London, 1991), o que também foi visualizado no presente trabalho. Outra hipótese para o resultado encontrado é o processo erosivo na área de pastagem, sugerido pelos resultados de D_s , PT, MaP e MiP, indo ao encontro dos resultados de Quijano *et al.* (2020), em que o arraste de partículas mais finas reduziu o teor de matéria orgânica da primeira camada, afetou a textura e aumentou a D_p . De ambas as formas, as áreas de agrofloresta apresentam qualidade física do solo superior a inicial, inclusive a nível de partícula (na primeira camada).

Em suma, os resultados encontrados reforçam a ideia da AS como ferramenta eficaz para conservação de solo e água, ao contribuir para a melhoria direta da qualidade física do solo. É capaz de reduzir processos erosivos e, num horizonte de tempo relativamente curto, converter áreas de pastagem degradada em ambientes de alta qualidade física do solo. Vale destacar que um dos grandes diferenciais da proposta de manejo da AS é justamente a dinâmica sistemática de poda nas espécies arbóreas, o que proporciona um aporte regular e abundante de material vegetal sobre o solo (Rebello e Sakamoto, 2022). A abundância de materiais vegetais também se associa a uma diversidade, haja vista que as podas são realizadas em plantas/árvores diferentes. Propicia, assim, um aporte de materiais com naturezas bioquímicas distintas, favorecendo uma amplitude de espécies no microbioma do solo (Zhang *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020). Dessa forma, percebe-se que o aporte abundante e regular de material orgânico diversificado é uma fonte propulsora de melhoria das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, em um processo contínuo e ascendente no sentido de melhoria da funcionalidade dos solos.

3.3. Curva de retenção de água no solo

As curvas de retenção de água no solo para as camadas 0-5 cm e 5-10 cm são apresentados nas Figuras 3 e 4. Os ajustes foram feitos com todos os conjuntos de medições disponíveis (6 amostras por profundidade por área). Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros de ajuste de cada curva pela equação de van Genuchten (1980).

Figura 3: Curvas de retenção de água no solo para a camada 0-5 cm

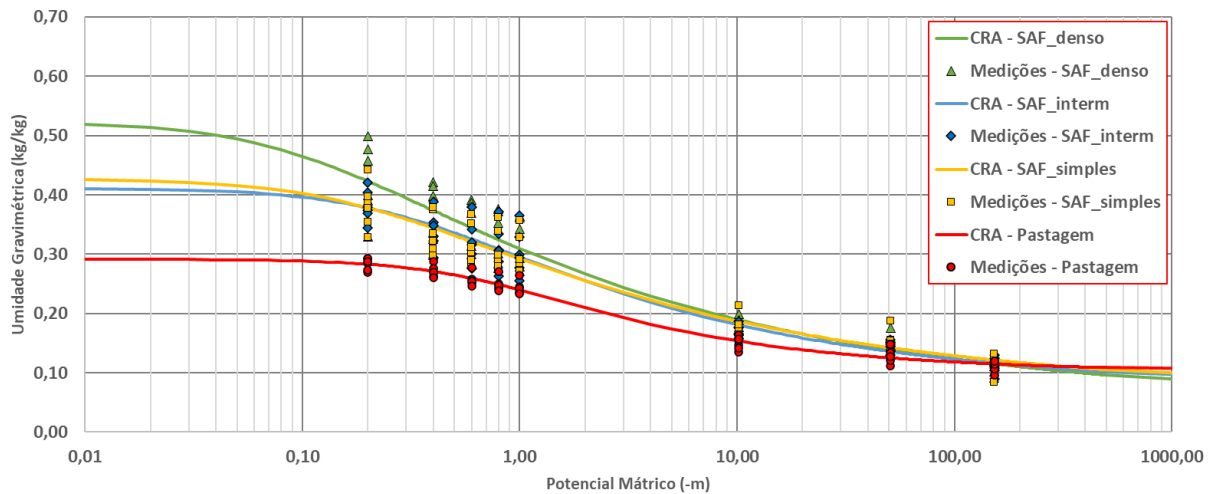


Figura 4: Curvas de retenção de água no solo para a camada 5-10 cm

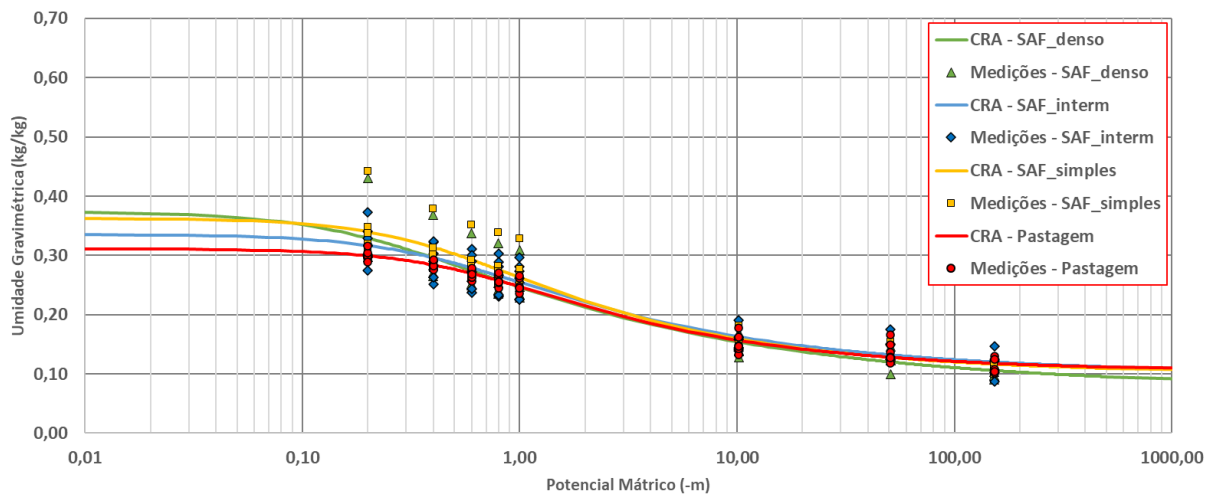


Tabela 5: Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água no solo pela equação de van Genuchten (1980)

Camada	Área	α	n	θ_s	θ_r
0-5 cm	<i>SAF_Denso</i>	8,921	1,266	0,524	0,045
	<i>SAF_Interm</i>	3,054	1,330	0,412	0,072

Camada	Área	α	n	θ_s	θ_r
	<i>SAF_Simples</i>	4,798	1,279	0,427	0,064
	<i>Pastagem</i>	1,396	1,482	0,292	0,101
5-10 cm	<i>SAF_Denso</i>	4,514	1,346	0,374	0,075
	<i>SAF_Interm</i>	2,240	1,419	0,335	0,100
	<i>SAF_Simples</i>	2,339	1,469	0,363	0,100
	<i>Pastagem</i>	1,643	1,481	0,311	0,103

α , n: parâmetros numéricos; θ_s : umidade na condição de saturação; θ_r : umidade residual

Os resultados, para cada profundidade, de capacidade de campo (CC), capacidade de água disponível (CAD), Índice S e θ_s (umidade na condição de saturação, ou o ponto onde a curva de retenção toca o eixo y) são apresentados na Tabela 6. Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey com nível de significância de 10% ($p < 0,10$). A ausência de letras indica diferenças não significativas.

Tabela 6: Comparação entre os resultados de CC, CAD, Índice S e θ_s pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade

Camada	Área	CC (kg/kg)	CAD (kg/kg)	Índice S	θ_s (kg/kg)
0-5 cm	<i>SAF_Denso</i>	0,319 \pm 0,042 a	0,208 \pm 0,035 a	0,089 \pm 0,027 a	0,510 \pm 0,169 a
	<i>SAF_Interm</i>	0,303 \pm 0,039 a	0,192 \pm 0,028 a	0,079 \pm 0,021 ab	0,500 \pm 0,147 ab
	<i>SAF_Simples</i>	0,301 \pm 0,034 a	0,185 \pm 0,032 a	0,062 \pm 0,011 bc	0,413 \pm 0,082 ab
	<i>Pastagem</i>	0,242 \pm 0,011 b	0,132 \pm 0,016 b	0,045 \pm 0,007 c	0,333 \pm 0,068 b
5-10 cm	<i>SAF_Denso</i>	0,252 \pm 0,031	0,148 \pm 0,023	0,064 \pm 0,021	0,433 \pm 0,160
	<i>SAF_Interm</i>	0,261 \pm 0,030	0,145 \pm 0,017	0,053 \pm 0,019	0,407 \pm 0,130
	<i>SAF_Simples</i>	0,259 \pm 0,011	0,138 \pm 0,013	0,063 \pm 0,012	0,433 \pm 0,109
	<i>Pastagem</i>	0,250 \pm 0,011	0,148 \pm 0,012	0,049 \pm 0,009	0,343 \pm 0,061

CC: capacidade de campo; CAD: capacidade de água disponível; θ_s : umidade na condição de saturação

As diferenças nas curvas de retenção para a primeira camada (0-5 cm) são caracterizadas principalmente pelo índice S e por θ_s , que estão relacionados à declividade da curva de retenção no seu ponto de inflexão e ao seu ponto mais alto, respectivamente. Nota-se, que o sistema

SAF_Denso apresenta, nesta camada, uma melhoria significativa da retenção de água no solo em comparação ao uso original (pastagem), sendo então uma perspectiva para os sistemas *SAF_Interm* e *SAF_Simples* no decorrer do tempo. Nestas duas áreas, os valores foram intermediários, representando o processo evolutivo de criação de espaço poroso no solo para a infiltração e o armazenamento de água, tendência esta destacada por Stöcker *et al.* (2020).

Estes resultados indicam que o solo das áreas de agrofloresta sucessional possui maior volume para saturação de água (van Genuchten, 1980), o que foi confirmado nos resultados de PT e MaP. Esta água fica retida no solo sob tensões muito fracas, inferiores à capacidade de campo, portanto não contribuindo diretamente para maior disponibilidade de água às culturas. Entretanto, este maior volume disponível para a água no solo na primeira camada (0-5 cm) representa uma maior capacidade de infiltração das primeiras gotas de chuva (Simfínek e van Genuchten, 1996), o que, associado aos resultados de K_s , reforçam a maior capacidade de infiltração desta primeira camada na área mais avançada no processo sucessional. Ou seja, reforçando a ideia de que a AS possui a capacidade de melhorar a conservação de água e solo ao longo do tempo.

Sobre o índice S, especificamente, Dexter (2004) sugere que valores de S superiores a 0,035 indicam uma muito boa estruturação do solo, o que foi visualizado em todas as áreas avaliadas. De fato, embora haja um processo de descompactação do solo decorrente da implantação dos SAFs sucessionais na propriedade, confirmado pelos resultados apresentados até então, os solos que predominam na região - Latossolos Vermelho-Amarelos e Cambissolos Háplicos Tb distróficos latossólicos - possuem naturalmente boas propriedades físicas como estrutura granular com grau de desenvolvimento forte, gerando alta permeabilidade (Lima *et al.*, 2007). Em áreas onde os solos apresentam menor grau de desenvolvimento e conseqüentemente menor qualidade física natural, ou mais degradados pelo uso agrícola inadequado, pode-se esperar uma diferença ainda maior nos resultados decorrentes do manejo preconizado pela AS.

Outro ponto relevante sobre o índice S é sua estreita correlação com a densidade do solo, a macroporosidade e a porosidade total (van Lier, 2014). Conforme discutido pelo autor, num contexto de agricultura, a melhoria do índice S reflete a melhoria dessas propriedades que não são somente importantes para a conservação de água e solo, mas também para o crescimento e desenvolvimento das raízes. O autor comenta, ainda, sobre a necessidade de se analisar o índice S a partir de comparações entre solos de mesmo tipo, e não como valores absolutos de referência, vide que diferentes classes de solo podem apresentar características intrínsecas de

densidade e de porosidade distintas, seguindo a mesma linha de análise proposta por Bruijnzeel (2004). No presente trabalho foi possível realizar comparações entre solos de mesmo tipo, estando os resultados associados ao índice S similares aos encontrados para a condutividade hidráulica, densidade do solo, macroporosidade e porosidade total.

Os resultados obtidos estão de acordo com Calonego e Rosolem (2011), que mostraram que a melhora no índice S com a utilização de plantas de cobertura como triticale (*X Triticosecale*) e girassol (*Helianthus annuus*) é progressiva no tempo e em profundidade. Em outras palavras, indica que as camadas mais superficiais do solo apresentam uma melhora mais significativa do que aquelas em maior profundidade, e assim sucessivamente. No estudo realizado pelos autores, a melhora do índice S na camada de 0-20 cm, após três anos de rotação de culturas, foi equivalente à realizada pela escarificação do solo por maquinário, num solo originalmente mais degradado, com índice S inicial inferior a 0,035 – limite proposto por Dexter (2004).

Para a camada de 5-10 cm não foram encontradas diferenças significativas. Ou seja, não se pode afirmar que há de fato melhora das propriedades de retenção de água no solo para além da primeira camada de 0-5 cm. Tal fato pode estar associado, como já exposto, à já elevada qualidade estrutural do solo na região, mascarando assim variações pouco expressivas, e necessitando de alterações mais pronunciadas, nas propriedades avaliadas, para que se evidenciem diferenças estatisticamente significativas.

Os ajustes das curvas de retenção para as primeiras camadas do solo possibilitaram a estimativa da capacidade de campo (CC), correspondente à umidade na tensão de -10 kPa (Rezende, 2016; Brito *et al.*, 2011; Carvalho, 2011). A capacidade de campo é definida como a quantidade máxima de água que o solo retém após drenagem da água gravitacional. Ou seja, representa o limite máximo de água no solo disponível para as culturas (Cassel e Nielsen, 1986). Os resultados da primeira camada (0-5 cm) mostram diferença significativa entre as áreas de agrofloresta e a área de referência (pastagem), reforçando a ideia de perda da qualidade física do solo na pastagem, decorrente, provavelmente, do aumento da densidade do solo, conforme evidenciado pelos resultados já apresentados. Nas áreas das agroflorestas, os maiores valores de CC – que não apresentam diferença significativa entre si – reforçam a ideia dos SAFs como estratégia para maior manutenção de água no solo e eficiência de uso pelas culturas (Ong *et al.*, 2017; Loaiza Puerta *et al.*, 2018; Muñoz-Villers *et al.*, 2020).

A similaridade entre os resultados de CC – e conseqüentemente de CAD – indica que os maiores valores de MaP e Ks, como visto no item 3.2 para os sistemas de estágios sucessionais mais

avançados, tendem a significar maiores benefícios para a recarga hídrica subterrânea do que para a disponibilidade de água para as culturas (Simfinek e van Genuchten, 1996). Em outras palavras, o manejo do solo nestes sistemas pode não alterar significativamente a disponibilidade de água para as plantas, mas certamente contribui para o aumento da eficiência do solo em receber (por infiltração) e conduzir/percolar água para camadas mais profundas, o que favorece a recarga hídrica dos mananciais. Estes resultados reforçam a ideia da AS como ferramenta para conservação de água, indo ao encontro dos trabalhos de Oliveira e Kazay (2015), Miccolis *et al.* (2016), Loaiza Puerta *et al.* (2018), se aproximando das características naturais de floresta, conforme anunciado por Rebello e Sakamoto (2022). Ampliando, assim, o potencial dos solos dessas áreas no que tange os serviços ecossistêmicos relacionados a captação, armazenamento e redistribuição do fluxo hídrico. Esta constatação possibilita uma ampliação da valorização dos agroecossistemas agroecológicos, em uma perspectiva aonde não se avalia somente o potencial de capacidade produtiva dos solos para as culturas de interesse, mas também outras funções do solo para o pleno funcionamento dos ecossistemas terrestres.

Por fim, a CRA da camada subsuperficial (80 cm) é apresentada na Figura 5. Os resultados de CC e PMP, em umidade volumétrica, para as camadas superficial (10 cm) e subsuperficial (80 cm) são apresentados na Tabela 7.

Figura 5: Curva de retenção de água no solo na camada de 80 cm

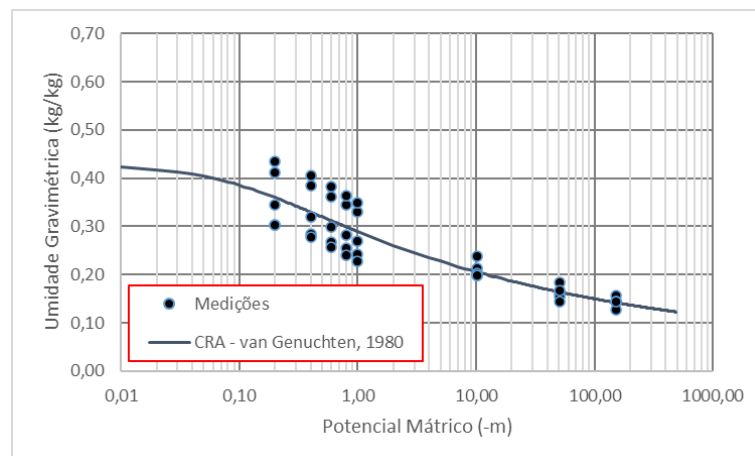


Tabela 7: Valores de referência de capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) para as camadas de 10 cm e 80 cm

Profundidade	CC (vol./vol.)	PMP (vol./vol.)
10 cm	0,317	0,138
80 cm	0,294	0,148

Os resultados encontrados de CC e PMP foram inferiores aos obtidos por Carvalho (2011), no município de Araponga/MG, localizado na porção oeste do Parque Estadual da Serra do Brigadeiro. O autor encontrou resultados médios de $0,358 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ e $0,207 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ para a CC e PMP da camada de 10 cm, respectivamente, e de $0,370 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ e $0,213 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ para CC e PMP da camada de 100 cm. Faz-se a ressalva de que, na área de estudo de Carvalho (2011), o solo apresentava teores de argila maiores, entre 42 e 57% na camada superficial (10 cm) e 51 e 60% na camada subsuperficial (100 cm). Não foram encontrados na literatura outros resultados de CC e PMP na região da Serra do Brigadeiro.

Destaca-se ainda, a redução da CC na camada subsuperficial (80 cm) em comparação com a superficial (10 cm), contrariando a tendência observada nos trabalhos de Carvalho (2011) e de Santana (2016), este último na cidade de Viçosa/MG, distante aproximadamente 40 km da área de estudo.

4. Conclusões

As análises realizadas nas camadas superficiais do solo (0-5 cm e 5-10 cm) de SAFs em diferentes estágios sucessionais permitiram evidenciar o potencial de melhoria da qualidade de propriedades físicas do solo, através do manejo da AS, principalmente quando comparado ao tipo de uso do solo anteriormente praticado com pastagem. Os resultados indicam que SAFs mais complexos e adensados, e com manejo frequente de podas, contribuem para o aumento da quantidade de poros, melhorando a capacidade de infiltração e armazenamento de água no solo. Maiores valores de porosidade total e de retenção de água acima da capacidade de campo nos sistemas mais avançados contribuem tanto para a produção agrícola em si quanto para a maior recarga hídrica subterrânea.

Nestes sistemas, as propriedades físicas do solo tendem a melhorar com o tempo, sendo este aspecto muito desejável para a validação do uso deste tipo de manejo em áreas de elevada relevância ambiental, principalmente atrelada aos serviços ecossistêmicos de regulação e provisão hídrica. Para a manutenção da dinâmica frequente de podas nestes sistemas, são utilizadas espécies que possuem, entre outras características, rápida capacidade de rebrota e facilidade de manejo.

5. Limitações do estudo e sugestões para estudos futuros

O estudo se restringiu à comparação das primeiras camadas do solo (0-5 cm e 5 – 10 cm), por serem as mais afetadas pelo manejo realizado (Stöcker *et al.*, 2020; Müller *et al.*, 2004). Estudos em camadas inferiores podem trazer resultados adicionais, evidenciando a influência das raízes dos componentes arbóreos na qualidade física do solo em profundidade. Stöcker *et al.* (2020) encontraram resultados significativos até a camada de 20 cm em SAFs, por exemplo.

A caracterização da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente na camada subsuperficial (80 cm) foi feito com apenas 5 amostras, distribuídas entre as áreas de SAF. Sugere-se, para estudos futuros, a tomada de amostras específicas para cada uma das áreas, visando a melhor caracterização e distinção entre os sistemas estudados, incluindo a área de referência (pastagem).

A melhora da qualidade física é apenas um dos aspectos ambientais relacionados ao manejo do solo. Estudos futuros podem investigar alterações na fertilidade química, relacionada à ciclagem e mineralização de nutrientes promovido por agroflorestas, e na biologia do solo, em termos de diversidade e composição. Ambos aspectos são importantes tanto do ponto de vista dos serviços ecossistêmicos providos por SAFs quanto do ponto de vista agrônomo.

Do ponto de vista socioeconômico, há de se investigar a sustentabilidade financeira do tipo de manejo proposto pela AS. Dentro dessa linha, para além da comparação entre produção e custos envolvidos no sistema, há de se discutir políticas públicas ligadas ao pagamento por serviços ambientais relacionados à conservação de solo e água.

Do ponto de vista científico, não se encontram artigos revisados por pares na temática específica da AS. Nesse sentido, há de se criar arranjos experimentais que sejam capazes de lidar com a complexa diversidade presente nesse tipo de sistema, de modo a validar suas proposições junto à comunidade científica internacional.

Referências Bibliográficas

ALTIERI, M. **Agroecologia**: bases científicas para uma agricultura sustentável. São Paulo, Expressão Popular, 2012.

- ALVARENGA, C. C.; MELLO, C. R.; MELLO, J. M.; SILVA, A. M.; CURI, N. Índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea (IQS_{RA}) na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 36, pp. 1608-1619, 2012.
- BAGYARAJ, J.D.; STÜRMER, S.L. Fungos micorrízicos arbusculares (FMAs). In: Moreira, F. M. S., organizador. **Manual de Biologia dos Solos Tropicais**. Lavras: UFLA; 2010.
- BIRDLIFE INTERNATIONAL. **Important Bird Area factsheet: Parque Estadual da Serra do Brigadeiro (Brazil)**. Disponível em: <https://datazone.birdlife.org/site/factsheet/parque-estadual-da-serra-do-brigadeiro-iba-brazil>. Acesso em: 23/12/2024.
- BRADY, N.; WEIL, R. **The Nature and Properties of Soils**, 13^a ed. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. p. 960. 2002.
- BRITO, A. S.; LIBARDI, P. L.; MOTA, J. C. A.; MORAES, S. O. Estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção e pela densidade de fluxo da água. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 35, pp. 1939-1948, 2011.
- BRUIJNZEEL, L. A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 104, pp. 185–228, 2004.
- CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Soil water retention and S index after crop rotation and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35, 1927-1937, 2011.
- CARVALHO, A. F. **Água e radiação em sistemas agroflorestais com café no território da Serra do Brigadeiro – MG**. Tese D. Sc. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa. 2011.
- CARVALHO, A. F.; GJORUP, D. F.; DE OLIVEIRA, G. B.; CARDOSO, I. M.; NONATO, H.; SOUTO, R. L.; BONFIM, V. R. **Sistematização das experiências com sistemas agroflorestais do CTA/ZM**. Relatório Final. Viçosa/MG, 151p., 2005.
- CARVALHO, R.; GOEDERT, W. J.; ARMANDO, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1153-1155, 2004.
- CASSEL, D. K.; NIELSEN, D. R. Field Capacity and Available Water Capacity. In: **Methods of Soil Analysis: Part 1 – Physical and Mineralogical Methods**. Editor Arnold Klute. SSSA Book Series, 1986.

CHEN, Q. *et al.* Soil moisture determines the consistency of organic matter decomposition in field and lab test patterns. **Catena**, 246, 108465, 2024.

CHERUBIN, M. R.; CHAVARRO-BERMEJO, J. P.; SILVA-OLAYA, A. M. Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. **Agroforest Syst.**, v. 93, pp. 1741-1753, 2019.

CTA-ZM. Território da Serra do Brigadeiro: **Plano Territorial de Desenvolvimento Rural Sustentável – PTDRS**. 81p, julho de 2005.

DAHIYA, G.; BHARDWAJ, K. K.; AHLAWAT, I.; DHILLON, R. S.; SINGH, C.; DEVI, S. Soil physical properties as influenced by different agroforestry systems in Haryana. **Eco. Env. & Cons.**, 28 (2), pp. 984-988, 2022.

DEXTER, A. R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, 120, p. 201-214, 2004.

DUNKERLEY, D. Organic Litter: Dominance over stones as a source of interrill flow roughness on low-gradient desert slopes at Fowlers Gap, Arid Western NSW, Australia. **Earth Surf. Process. Landforms** 28, 15–29, 2003.

EGUCHI, E. S.; SILVA, E. L.; OLIVEIRA, M. S. Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no Município de Lavras, MG. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.242-246, 2002

EMBRAPA. **Compactação do solo e crescimento de plantas**. Como identificar, evitar e remediar. Documentos, 56. Rio de Janeiro, 2003.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª edição. Rio de Janeiro, RJ, 574 p., 2017.

EMBRAPA. **Práticas de conservação de solo e água**. Circular Técnica 133. ISSN 0100-6460. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Campina Grande, PB, Brasil. 2012.

FAZENDA DA TOCA. **Tecnologias da floresta: sucessão natural das plantas**. Disponível em: <https://fazendadatoca.com.br/tecnologias-da-floresta-sucessao-natural-das-plantas/>. Acesso em 02/01/2025.

FRANCO, F. S.; COUTO, L.; CARVALHO, A. F.; JUCKSCH, I.; FERNANDES FILHO, E. I.; SILVA, E.; MEIRA NETO, J. A. A. Quantificação de erosão em sistemas agroflorestais e

convencionais na Zona da Mata de Minas Gerais. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.26, n.6, p.751-760, 2002.

GAMA-RODRIGUES, A. C. Ciclagem de nutrientes em sistemas agroflorestais na região tropical: funcionalidade e sustentabilidade. **Anais do IV Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais**. Rio de Janeiro, p. 67 – 87, 2004.

GJORUP, G. B. **Planejamento Participativo de uma unidade de conservação e do seu entorno: o caso do Parque Estadual da Serra do Brigadeiro**. Tese de Doutorado. Viçosa: UFV, 113p, 1998.

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **R. Bras. Ci. Solo**, 37:1174-1184, 2013.

GRAVES, S.; PIEPHO, H.; DORAI-RAJ, L. S. **multcompView: Visualization of Paired Comparisons**. R package version 0.1-10, 2024. <https://CRAN.R-project.org/package=multcompView>

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **R. Bras. Ci. Solo**, 29:169-177, 2005.

HAKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil Tillage Res.**, 53:71-85, 2000.

HOTT, M. C.; ANDRADE, R. G.; VILELA, D.; MAGALHÃES JUNIOR, W. C. P.; PACIULLO, D. S. C.; GOMIDE, C. A. M.; ROCHA, W. S. D.; D'OLIVEIRA, P. S. Disponibilização de mapeamento das condições das pastagens por meio de plataforma de dados geográficos. **Contemporary Journal**, 3(12): 26326-26342, 2023.

INCAPER. **Palmeira Juçara: Patrimônio natural da Mata Atlântica do Espírito Santo**. Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. Vitória, ES, 2017.

JACKSON, N. *et al.* **Water Balance of Agroforestry Systems on Hillslopes - Phase II**. Final Technical Report to the Forestry Research Programme, Department for International Development. 1998. 70 p.

KAUTZ, T. Research on subsoil biopores and their functions in organically managed soils: A review. **Renewable Agriculture and Food Systems**. 30(4); 318–327, 2014.

- LIBARDI, P. L. Água no solo. In: **Física do Solo**, ed.: van Lier, Q. J., SBCS, Viçosa, 298 p., 2010.
- LIMA, V. C.; LIMA, M. R.; MELO, V. F. Classificação brasileira de solos. In: LIMA, V. C.; LIMA, M. R.; MELO, V. F. (Eds.). **O solo no meio ambiente**: abordagem para professores do ensino fundamental e médio e alunos do ensino médio. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, p. 77-88, 2007.
- LIU, C.; LI, L.; XIE, J.; COULTER, J. A.; ZHANG, R.; LUO, Z.; CAI, L.; WANG, L.; GOPALAKRISHNAN, S. Soil Bacterial Diversity and Potential Functions Are Regulated by Long-Term Conservation Tillage and Straw Mulching. **Microorganisms**, 8, 836, 16 p., 2020.
- LOAIZA PUERTA, V. *et al.* Improvement of soil structure through organic crop management, conservation tillage and grassclover ley. **Soil and Tillage Research**, 180:1-9, 2018.
- LONDON, J. R. **Booker Tropical soil manual handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics**. Paperback edition, Longman Scientific and Technical, New York. p. 474. 1991.
- MARCATTO, F. S.; SILVEIRA, H. Relação entre as propriedades físicas e hídricas e os tipos de uso da terra em Neossolos Regolíticos da bacia hidrográfica do rio Pirapó-PR. **Caderno de Geografia**, v.27, n.50, 2017.
- MATOS, P. S.; CHERUBIN, M. R.; DAMIAN, J. M.; ROCHA, F. I.; PEREIRA, M. G.; ZONTA, E. Short-term effects of agroforestry systems on soil health in Southeastern Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 96, pp. 897-908, 2022.
- MEDEIROS, R. D.; SOARES, A. A.; GUIMARÃES, R. M. Compactação do solo e manejo da água. I: Efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 29, n. 5, p. 940-947, set./out., 2005.
- MEURER, E. J. Fatores que influenciam o crescimento e desenvolvimento das plantas. In: Novais, R. F., Alvarez, V. H., Barros, N. F., Fontes, R. L. F., Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. (Eds). **Fertilidade do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.65-90, 2007.
- MICCOLIS, A. *et al.* **Restauração Ecológica com Sistemas Agroflorestais** – Como conciliar conservação com produção. Opções para Cerrado e Caatinga. Guia Técnico. Brasília: Instituto Sociedade, População e Natureza – ISPN/Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal – ICRAF, 2016.

MONTEITH, J. L.; ONG, C. K.; CORLETT, J. E. Microclimatic interactions in agroforestry systems. **Forest Ecology and Management**, v. 45, pp. 31–44, 1991.

MOREIRA, W. K. O. *et al.* Velocidade de Infiltração Básica da Água no Solo em Diferentes Agroecossistemas Amazônicos. **Agrarian Academy**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.4, n.7; p.463-473, 2017.

MUÑOZ-VILLERS, L. E. *et al.* Coffee and shade trees show complementary use of soil water in a traditional agroforestry ecosystem. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 24, 1649–1668, 2020.

NONATO, H. S. **Sistematização da experiência participativa com Sistemas Agroflorestais: rumo à sustentabilidade da agricultura familiar na Zona da Mata Mineira**. Tese de Doutorado. Viçosa: UFV, 145p, 2006.

OCHIAI, H.; NAKAMURA, S. A função da Camada Serrapilheira no Controle da Erosão do Solo. In: **Pesquisas em Conservação e Recuperação Ambiental no Oeste Paulista**. Instituto Florestal, São Paulo, 2004.

OLIVEIRA, A. C. C. **Sistemas agroflorestais com café: fixação e neutralização de carbono e outros serviços ecossistêmicos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa – UFV, 141 p., 2013.

OLIVEIRA, L. A.; KAZAY, D. F. Sistemas agroflorestais e a provisão de serviços hidrológicos em Barra do Turvo (SP). **Agriculturas**, v. 12, n. 3, 2015.

OLIVEIRA, R. A. C. *et al.* Plant diversity and local environmental conditions indirectly affect litter decomposition in a tropical forest. **Applied Soil Ecology**, 134, 45-53, 2019.

ONG, C. *et al.* Agroforestry: Hydrological Impacts. In: **Reference Module in Food Science**. Elsevier, 2017.

PRIMAVESI, A. M. **Manejo ecológico do solo**. 1ª ed. Editora Nobel. 552 p. 2002.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2024. <https://www.R-project.org/>

REBELLO, J. F. S.; SAKAMOTO, D. G. **Agricultura Sintrópica segundo Ernst Götsch**. Edições Aguará. 2ª ed, 2022. 175 p.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 32, pp. 1805-1816, 2008.

REZENDE, C. H. S. **Determinação da capacidade de campo em latossolos com diferentes texturas**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2016.

RIBEIRO, M. A. V.; NOVAIS, R. F.; FAQUIN, V.; FERREIRA, M. M.; FURTINI NETO, A. E.; LIMA, J. M.; VILLANI, E. M. A. Resposta da soja e do eucalipto ao aumento da densidade do solo e a doses de fósforo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 34, pp. 1157-1164, 2010.

RUEHLMANN, J. Soil particle density as affected by soil texture and soil organic matter: 1. Partitioning of SOM in conceptual fractions and derivation of a variable SOC to SOM conversion factor. **Geoderma**, v. 375, 114542, 2020.

SANTANA, F. C. **Dinâmica da água no solo e modelagem digital de radiação em sistemas agroflorestais de café**. Dissertação M. Sc. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa. 2016.

SCHJONNING, P.; McBRIDE, R. A.; KELLER, T.; OBOUR, P. B. Predicting soil particle density from clay and soil organic matter contents. **Geoderma**, 286, 83-87, 2017.

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Projeto Integrado de Pesquisa e Desenvolvimento em Agricultura Familiar (PROPEDAF) – Relatório Técnico Subprojeto 01**. Viçosa: FUNARB/EPAMIG, 79p, 2002.

SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesq. Agropec. Bras.**, 32:213-220, 1997.

SILVA, J. C.; OLSZEWSKI, N.; PEREIRA, J. S.; SILVA, E. P. Influence of soil compactation levels on cowpea production. **Engenharia na Agricultura**, v.28, p. 1-10, 2020.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 24, pp. 191-199, 2000.

SIMFINEK, J.; van GENUCHTEN, M. T. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. **Water Resources Research**, Vol. 32, No. 9, p. 2683-2696, 1996.

SIRIRI, D.; TENYWA, M. M.; ONG, C. K.; BLACK, C. R.; BEKUNDA, M. A. Water infiltration, conductivity and runoff under fallow agroforestry on sloping terraces. **African Crop Science Journal**, vol. 14, n. 1, pp. 59-71, 2006.

SOUZA, H. N. *et al.* Selection of native trees for intercropping with coffee in the Atlantic Rainforest biome. **Agroforest Syst**, v. 80, p. 1-16, 2010.

SMETTEM, K. R. J.; COLLIS-GEORGE, N. The influence of cylindrical macropores on steady-state infiltration in a soil under pasture. **Journal of Hydrology**, 79, 107—114, 1985.

SPOHR, R. B.; CARLESSO, R.; GALLÁRRETA, C. G.; PRÉCHAC, F. G.; PETILLO, M. G. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Cienc. Rural**, v. 39, pp. 74–81, 2009.

STÖCKER, C. M. *et al.* Short-term soil physical quality improvements promoted by an agroforestry system. **Agroforest Syst.**, 94:2053–2064, 2020.

TARRÁ, I. L. C.; LUIZÃO, F. J.; WANDELLI, E. V.; TEIXEIRA, W. G.; MORAIS, W. J.; CASTRO, J. G. D. Tempo de uso em pastagens e volume dos macroporos do solo na Amazônia Central. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.14, n.6, p.678–683, 2010.

TEIXEIRA, H. M.; BIANCHI, F. J. J. A.; CARDOSO, I. M.; TITTONELL, P.; PEÑA-CLAROS, M. Impact of agroecological management on plant diversity and soil-based ecosystem services in pasture and coffee systems in the Atlantic Forest of Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 305, 107171, 2021.

VAN GENUCHTEN, M.T. A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 44:892-898, 1980.

VAN LIER, Q. J. Revisiting the S-index for soil physical quality and its use in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38, 1-10, 2014.

WANG, L. *et al.* Soil Infiltration Characteristics in Agroforestry Systems and Their Relationships with the Temporal Distribution of Rainfall on the Loess Plateau in China. **PLoS ONE** 10(4): e0124767. 2015.

WICKHAM, H.; FRANÇOIS, R.; HENRY, L.; MÜLLER, K.; VAUGHAN, D. **dplyr: A Grammar of Data Manipulation**. R package version 1.1.4, 2023. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>

YANA, W.; WEINERT, H. **Técnicas de sistemas agroforestales Multiestrato: Manual práctico**. La Paz: Interinstitucional Alto Beni, 56 p, 2001.

YOUNG, A. **Agroforestry for soil conservation**. CAB International. ICRAF - International Council for Research in Agroforestry. ISBN 0 85198 648 X. 1989.

ZHANG, S.; WANG, Y.; SUN, L.; QIU, C.; DING, Y.; GU, H.; WANG, L.; WANG, Z.; DING, Z. Organic mulching positively regulates the soil microbial communities and ecosystem functions in tea plantation. **BMC Microbiology**, 20:103, 13 p., 2020.

ZHOU, Z. *et al.* Tree species selection for optimizing soil carbon storage: Insights from litter decomposition and bacterial community analysis in coastal ecosystems. **Journal of Environmental Management**, 370, 122984, 2024.

INFLUÊNCIA DO MANEJO DE PODAS NA DINÂMICA TÉRMICA E HÍDRICA DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS SUCESSIONAIS

Resumo

A degradação dos solos no Brasil tem sido associada às práticas agrícolas inadequadas, como a monocultura. Sistemas agroflorestais (SAFs) surgem como uma alternativa sustentável, promovendo melhorias na física do solo, aumento da biodiversidade local e maior segurança alimentar através da diversificação da produção. No entanto, modelos simplificados de SAFs, podem ser também insustentáveis, gerando saldo energético negativo e limitados benefícios frente aos que sistemas mais diversos podem trazer. A Agricultura Sintrópica (AS) propõe o manejo de SAFs a partir da ótica da sucessão ecológica, valendo-se de técnicas como o plantio adensado e diversificado, alta estratificação dos sistemas e o manejo frequente de podas. Se por um lado o plantio de espécies arbóreas junto com a cultura principal apresenta inúmeros benefícios, no que concerne à competição por água e ao uso da água de forma geral, ainda é objeto de pesquisa que apresenta grande controvérsia, com destaque para a ampla frequência de estudos com SAFs pouco diversificados. Este estudo foi realizado no Sítio Jardim da Irmandade, em Muriaé, MG, com o objetivo de avaliar os impactos do manejo de podas na dinâmica hídrica e térmica de SAFs sucessionais. O experimento envolveu três SAFs contíguos, em estágios sucessionais diferentes (*SAF_Simples*, *SAF_Interm* e *SAF_Denso*). Foram monitoradas por um ano hidrológico as variáveis: umidade do solo nas camadas 10 cm e 80 cm, temperatura do solo a 10 cm, temperatura do ar a 1 m do solo e precipitação interna, em parcelas manejadas e não manejadas dos três SAFs. O manejo de podas foi realizado através de um mutirão agroecológico. Fotografias hemisféricas e o cálculo de índices de vegetação antes e após o manejo de podas foram realizadas para caracterizar a abertura do dossel e avaliar a condição dos cultivos. Os resultados indicaram que as podas drásticas promoveram maior percolação de água para camadas profundas do solo, principalmente pela redução da interceptação da precipitação pelas copas das árvores. Além disso, o material podado contribuiu para a regulação térmica do solo, o que contribuiu para redução da evaporação direta. Durante o período monitorado não houve restrições hídricas significativas nas áreas monitoradas. Apesar disto, o *SAF_Simples* apresentou os piores índices de vegetação e temperatura após o manejo de podas. As podas promoveram aumento imediato da temperatura nas parcelas. No *SAF_Denso* houve maiores teores de umidade no solo do que nos demais, reforçando a ideia de

que a complexidade dos SAFs sucessionais cria condições ideais para o estabelecimento e manutenção das culturas, aumentando a disponibilidade hídrica para as mesmas. O estudo reforça o papel da AS como uma abordagem promissora para a Agroecologia, demonstrando que o manejo adequado das podas pode maximizar os benefícios ambientais promovidos pelos SAFs, promovendo maior resiliência hídrica e térmica nos agroecossistemas. Além disso, aponta caminhos para os estudos de dinâmica hídrica em SAFs ao tomá-los como sistemas complexos e dinâmicos no tempo e no espaço.

1. Introdução

Após a colonização, a ocupação do território brasileiro se desenvolveu principalmente pela conversão da cobertura natural do solo em áreas de produção agrícola com somente uma espécie vegetal (monocultura). Tal fato provocou mudanças profundas nas características químicas, físicas e biológicas do solo (Bagyaraj e Stürmer, 2010). Estima-se, atualmente, que cerca de 22% das terras brasileiras estejam degradadas. A principal responsável por este cenário é a atividade agropecuária com uso de práticas ambientalmente inadequadas (Bai *et al.*, 2008). A perda de solo por erosão hídrica em território brasileiro é estimada em 616,5 Mt.ano⁻¹ em lavouras anuais, com custo de reposição de nutrientes da ordem de 1,3 bilhões de dólares por ano (Dechen *et al.*, 2015).

Neste contexto, a adoção de sistemas agroflorestais (SAFs) pode trazer benefícios diretos para os agroecossistemas como o aumento do teor de matéria orgânica do solo (Müller, 2004; Pulrolnik, 2009; Tisdall e Oades, 1982), maior ciclagem de nutrientes e menor dependência de insumos externos (Schroth *et al.*, 2004), maiores taxas de infiltração de água no solo (Stöcker *et al.*, 2020; Loaiza Puerta *et al.*, 2018; Carvalho *et al.*, 2004), controle da erosão (Franco *et al.*, 2002), menor stress térmico (Gomes *et al.*, 2020), maior diversidade produtiva (Ferreira *et al.*, 2025), maior segurança alimentar e nutricional (Waldron *et al.*, 2017), entre outros. Em uma escala global, o plantio de árvores contribui para maior sequestro de carbono, contribuindo para redução da vulnerabilidade dos sistemas agrícolas às mudanças climáticas (IPCC, 2019) e manutenção da biodiversidade (Schroth *et al.*, 2004).

Entretanto, modelos simplificados de SAFs, podem ser também insustentáveis, gerando saldo energético negativo (Rebello e Sakamoto, 2022), e limitados benefícios frente aos que sistemas mais diversos podem trazer – sendo consideradas “monoculturas sombreadas” (Avelino *et al.*,

2023) – e não quebrando o paradigma imposto pelo sistema monocultural (Gregio, 2020), onde gasta-se muita energia na forma de inputs externos como água, fertilizantes e defensivos (Baleeiro e De Marco Jr, 2018). Em um contexto de mudanças climáticas, onde muito se discute a fixação de carbono no solo, Baldi *et al.* (2024) mostra que SAFs mais complexos apresentam maiores teores de carbono orgânico total no solo do que SAFs simplificados na Amazônia.

Pensando nisso, e após observar por décadas a dinâmica de funcionamento das árvores em áreas não manejadas de regeneração natural, o suíço Ernst Götsch compilou o que hoje conhecemos como Agricultura Sintrópica (AS). Nela, o mecanismo que rege o manejo dos agroecossistemas não é apenas a inclusão de árvores, mas a sucessão ecológica em si. Neste sentido, o sistema caminha do simples para o complexo, aproximando as características ecológicas das florestas aos sistemas agrícolas produtivos (no sentido sempre do acúmulo de energia) a partir do plantio em alta densidade, da ocupação dos diferentes estratos e das frequentes podas (Baleeiro e De Marco Jr, 2018; Rebello e Sakamoto, 2022).

Nos SAFs sucessionais – aqueles que respeitam o princípio da sucessão ecológica – as podas são realizadas com o objetivo principal de promover entrada de luz para o sistema, acumular biomassa em decomposição junto ao solo e manter a correta ocupação dos estratos planejados (Rebello e Sakamoto, 2022; Gregio, 2020).

Atualmente, embora os SAFs se apresentem como possível solução para problemas urgentes, pouca atenção é dada para a influência do grau de sucessão ecológica e para o papel das podas em agroflorestas (Fogaça *et al.*, 2023). A inclusão do fator poda nos estudos em agrofloresta ainda é bem limitada, com poucos artigos encontrados na literatura que tratam especificamente sobre o impacto deste manejo nas culturas, no solo ou no ecossistema de forma mais ampla, ainda mais quando se avaliam sistemas complexos tais como os propostos pela AS.

Zanella e Coelho (2014) estudaram o efeito da biomassa de podas de algumas espécies arbóreas na cultura do milho, no estado de Santa Catarina, e concluíram que o controle da vegetação espontânea promovida pelo aporte do material podado nas entrelinhas de plantio do milho contribuiu para maior produção na safra plantada logo após o manejo de podas.

Em plantações de cacau na Bolívia, Esche *et al.* (2023) contabilizaram os benefícios econômicos promovidos pelo controle de luz realizado através das podas, concluindo que a realização das podas contribui para o aumento da produtividade da cultura do cacau. Por outro lado, representa uma fonte considerável de despesa, cabendo aos(às) agricultores(as) definir

uma frequência e *timing* ótimo para sua realização, visando tornar este manejo mais eficiente economicamente, inclusive.

O manejo de podas de árvores em SAFs também se apresenta como ferramenta fundamental para manutenção de condições microclimáticas ótimas para culturas sombreadas, como por exemplo a do cacau e do café. As podas regulam a entrada de radiação e de precipitação ao passo que mantém diversidade ecológica do agroecossistema (Niether *et al.*, 2018), equilibram a competição por água e nutrientes entre a cultura do sub-bosque e o componente arbóreo (Suprayogo *et al.*, 2020) e reduzem a transmissão de patógenos no interior da lavoura (Avelino *et al.*, 2023). Podem acontecer de forma mais drástica, com a remoção de árvores inteiras ou manutenção somente do tronco principal, ou de forma mais branda, apenas com a retirada de alguns galhos (Gregio, 2020), a depender da intenção do(a) agricultor(a).

Ainda, a combinação do manejo de podas com a adubação orgânica pode promover benefícios à microbiota do solo, mantendo relação C/N propícia para a rápida decomposição da biomassa aportada ao solo e para a ativação microbiológica do solo em SAFs com café (Azizah *et al.*, 2023). Se bem planejada, a poda pode contribuir para a disponibilização de macronutrientes como nitrogênio e fósforo para o café, na época de sua maior necessidade nutricional – durante o enchimento rápido dos grãos (Tully e Lawrence, 2012).

Outros estudos (Brenner, 1996; Ong *et al.*, 2002; Hartoyo *et al.*, 2020, Waktola e Fekadu, 2021), embora não estudem efeitos das podas especificamente, trazem a necessidade de sua realização para o melhor manejo em SAFs diversos, visando a adequação dos níveis de radiação para os diferentes estratos e equilibrando a competição por água e nutrientes entre as culturas. Nesse sentido, Gliessman (2008) destaca que quão maior o grau de estratificação do sistema, mais complexa é a tarefa de equilibrar a entrada de radiação através das podas, sendo fundamental, então, conhecer as características ecofisiológicas das plantas envolvidas. A escolha das espécies envolvidas é fundamental para o sucesso destes sistemas (Souza *et al.*, 2010).

No que se relaciona com o balanço hídrico do solo mais especificamente, a melhora dos atributos físicos do solo contribui diretamente para a melhor regulação de parte do ciclo hidrológico no sítio produtivo a partir da maior infiltração e manutenção de água no solo (Loaiza Puerta *et al.*, 2018). Estudos conduzidos em áreas de agrofloresta já mostram o impacto positivo na produção de água na propriedade (Oliveira e Kazay, 2015; Gregio, 2020), na maior eficiência de uso da água no solo (Ong *et al.*, 2017; Muñoz-Villers *et al.*, 2020) e mesmo na proteção direta de nascentes (Miccolis *et al.*, 2016). Entretanto, se por um lado o plantio de

espécies arbóreas junto com a cultura principal apresenta inúmeros benefícios, no que concerne à competição por água e ao uso da água de forma geral, ainda é objeto de pesquisa que apresenta grande controvérsia (Wang *et al.*, 2017; Bruijnzeel, 2004).

No que concerne à entrada de água pela precipitação, Monteith *et al.* (1991) concluem que a implantação de árvores aumenta a interceptação da precipitação, ocasionando maior perda de água para a atmosfera. Wang *et al.* (2017) verificaram que em SAF houve 16% menos infiltração de água em comparação ao sistema convencional devido à interceptação de água pela copa das árvores. Monteith *et al.* (1991) verificaram que em SAFs a temperatura do solo e a velocidade do vento foram inferiores em comparação ao sistema convencional, resultando em menores perdas por evaporação direta do solo. Entretanto, os autores calculam que este ganho não é superior à perda adicional provocada pela interceptação da precipitação pelas árvores. Carvalho (2011) verificou que a drenagem profunda (>160 cm) do solo em SAFs foi inferior que a de sistema convencional, pelo mesmo motivo.

Por outro lado, a poda das árvores em SAFs e a alocação da biomassa nas linhas de plantio pode contribuir diretamente para a redução da evaporação do solo e da evapotranspiração das árvores. Este manejo mantém mais água no solo para as culturas adjacentes, ao mesmo tempo em que também cria mais oportunidade para recarga subterrânea (Ong *et al.*, 2017; Siriri *et al.*, 2013). Com as podas, as perdas por interceptação provocadas pelas árvores podem ser atenuadas, garantindo níveis de umidade no solo semelhantes à de cultivos convencionais (Thorud, 1963; Jackson *et al.*, 1998; Jackson *et al.* 2000), de tal forma que pesquisas mostram a redução da demanda por irrigação em áreas de agroflorestas bem manejadas (Guimarães e Mendonça, 2019). Ou seja, quando o manejo de podas é incluído no balanço hídrico de SAFs, as perdas hídricas podem ser reduzidas, mantendo-se ainda os benefícios promovidos pela melhora da qualidade física do solo e pelo aumento da biodiversidade.

Visando a maior disponibilidade de água no solo para a cultura de sistema radicular mais superficial, o manejo de poda deve ser capaz de proporcionar o maior aprofundamento do sistema radicular das árvores, visando uma complementariedade entre as raízes das árvores e as da cultura de interesse (Ong *et al.*, 2002). Estratégias também podem ser traçadas para a determinação da época da poda, levando em conta o período chuvoso ou o período de plantio da cultura subjacente às árvores, de modo a gerar complementariedade no uso da água (Jackson *et al.*, 2000) e controle da vegetação espontânea (Zanella e Coelho, 2014).

Ong *et al.* (2002) apontam uma limitação para o manejo de podas, que ocorre quando da árvore em questão se deseja extrair frutos. Neste caso, o manejo de podas na árvore frutífera pode ficar atrasado, comprometendo a entrada de luz no estrato arbustivo. Para isso, os autores destacam que o ideal é que as árvores utilizadas para sombreamento da cultura principal sejam árvore cujo interesse seja a produção de madeira. Na AS, planta-se em alta densidade e muitas das árvores são consideradas apenas “de serviço”, ou seja, estão lá para serem podadas frequentemente, sem objetivo específico de produção primária, mas sim contribuindo no aporte de biomassa ao solo e nos impactos decorrentes (Rebello e Sakamoto, 2022; Miccolis *et al.*, 2016).

Neste contexto, o presente trabalho visa proporcionar maior compreensão sobre o efeito das podas – e, em última análise, da AS de forma ampla – na dinâmica hídrica e térmica de SAFs. Para isso, o trabalho objetivou monitorar por um ano hidrológico completo variáveis ligadas ao balanço hídrico do solo: umidade na camada superficial (10 cm) e subsuperficial (80 cm), temperatura do ar (a 1 m do solo) e do solo (a 10 cm de profundidade) e precipitação interna. Além disso, objetivou caracterizar o manejo de podas realizado na propriedade e, com auxílio de veículos aéreos não tripulados (VANTs), obter fotografias multiespectrais das áreas antes e após o manejo de podas para o cálculo de índices de vegetação e temperatura.

2. Material e Métodos

2.1. Caracterização da Área de Estudo

O estudo foi desenvolvido no Sítio Jardim da Irmandade, localizado na fronteira sul do Parque Estadual Serra do Brigadeiro, na comunidade da Graminha, município de Muriaé, na Zona da Mata Mineira (20°54'45”S, 42°32'53”O). A altitude média local é de 1000 metros. O clima predominante da região é o Temperado Chuvoso (mesotérmico) – Cwb, também chamado de subtropical de altitude, caracterizado por verões chuvosos e invernos de 4 a 5 meses secos (PROPEDAF, 2002). A temperatura média anual é de 18 °C e a precipitação média anual é de 1300 mm (BirdLife International, 2024). Um mapa de localização da propriedade é apresentado na Figura 6. As áreas de agroflorestas foram implementadas na propriedade desde 2016, com foco principal na produção de café (*Coffea arabica*) e juçara (*Euterpe edulis*).

Foram selecionadas três áreas distintas, contíguas, representativas do processo sucessional de evolução dos sistemas agroflorestais da propriedade: *SAF_Simples*, *SAF_Interm* e *SAF_Denso*.

A caracterização destas áreas é apresentada na Tabela 8. A diferença entre as três áreas não deve ser entendida simplesmente pelas idades distintas, ou mesmo pela densidade de plantio distintas, mas sim pelos seus diferentes estágios sucessionais. Quão mais avançado no estágio sucessional, maior a riqueza de espécies e a densidade de componentes arbóreos, gerando uma maior estratificação do sistema (Rebello e Sakamoto, 2022).

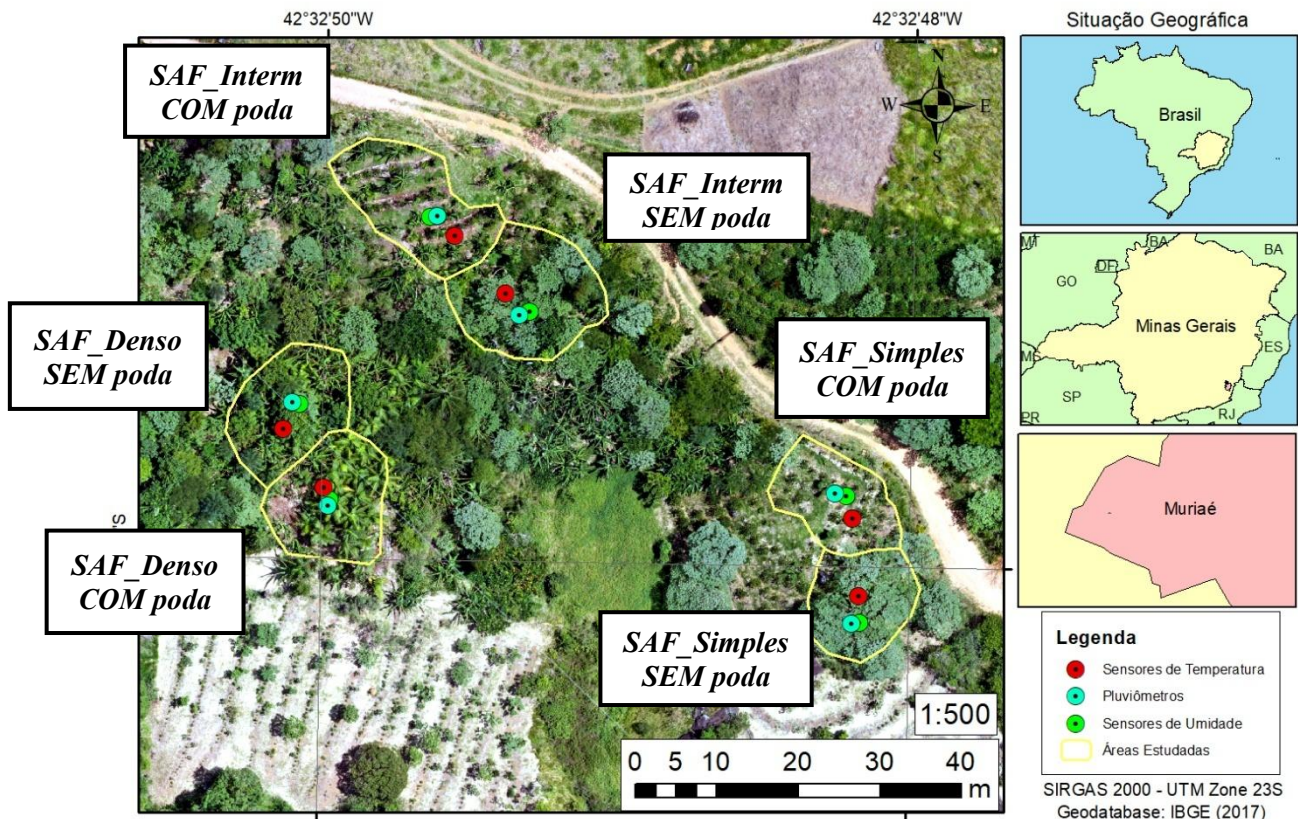
Tabela 8: Caracterização da composição arbórea de cada SAF estudado

Talhão	Ano de implantação	Nº de indivíduos arbóreos	Área (m ²)	Densidade (árvores/ha)	CAP médio (cm)	DAP médio (cm)	Riqueza	Espécies
<i>SAF_Simples</i>	2019	20	296	675	26,8	8,5	3	Capoeira-branca, Goiabeira, Tamboril
<i>SAF_Interm</i>	2018	48	432	1.111	29,	9,3	10	Abacateiro, Araçá, Araucária, Bananeira, Capoeira-branca, Guapuruvu, Juçara, Mamoeiro, Pau balsa, Tamboril
<i>SAF_Denso</i>	2016	77	364	2.115	23,4	7,5	13	Abacateiro, Amoreira, Araucária, Assa-peixe, Cacaueiro, Capoeira-branca, Castanha do maranhão, Citrus, Guapuruvu, Ingazeiro, Juçara, Pitanga, Tamboril

CAP: comprimento a altura do peito; DAP: diâmetro a altura do peito

Cada área foi dividida em 2 parcelas: uma com a realização do manejo de podas e outra sem o manejo, tendo sido mantidas as copas das árvores durante todo o período de monitoramento térmico e hídrico, que se estendeu de 26/08/2023 a 07/10/2024. As podas foram realizadas no início da estação chuvosa, em outubro/2023.

Figura 6: Localização da área de estudo



2.2. Manejo e caracterização das podas

As podas realizadas na propriedade são feitas anualmente no período anterior a chegada das chuvas, normalmente entre setembro e outubro. É feita a remoção da copa das árvores de serviço, de forma que após o final da estação chuvosa, estas já tenham suas copas recuperadas. Assim, durante o verão as plantas do sub-bosque (principalmente cafés e palmeiras-juçaras em formação) recebem maior incidência de precipitação e luz solar, ao mesmo tempo em que o material vegetal depositado nas linhas se decompõe com maior velocidade (Chen *et al.*, 2024), servindo para o controle da vegetação espontânea (Zanella e Coelho 2014) e retenção de umidade (Chen *et al.*, 2007).

Pensando na pesquisa em Agroecologia indissociada dos três pilares apresentados por Wezel (2009) – ciência, movimento social e prática – o manejo de podas realizado no contexto do presente trabalho foi proposto no formato de mutirão, seguindo o roteiro descrito por Silva (2023), que propõe as etapas de: mobilização, organização, planejamento, execução e avaliação. O mutirão foi realizado no início do mês de outubro/2023.

A caracterização das podas realizadas foi feita através das fotografias hemisféricas (Galvani e de Lima, 2014), tiradas da altura dos pluviômetros instalados (próximo às alturas dos pés de café), cerca de 1,70 m acima do solo. Foi utilizada câmera com lente grande-angular tipo olho de peixe (*Fish Eye*). As imagens foram processadas com a utilização da linguagem computacional R (R Core Team, 2024) especificamente com a utilização do pacote “*hemispher*” (Chianucci e Macek, 2023), para caracterização da abertura do dossel nas parcelas antes e após o manejo de podas realizado.

Leite (2021) destaca que o sombreamento do sub-bosque em SAFs também se altera em função da distância à borda da área, tendendo para maior sombreamento no interior da parcela. No presente trabalho, as fotografias foram tomadas no centro da parcela, no local dos pluviômetros instalados (Figura 6), representando então, teoricamente, os maiores valores das áreas monitoradas.

2.3. Monitoramento da precipitação interna

O monitoramento da precipitação interna foi realizado com a utilização de pluviômetros de boca larga, com área de recepção de 100 cm². Foi instalado um pluviômetro em cada parcela, além de um pluviômetro em área aberta, afim de registrar a chuva de referência, totalizando 7 pluviômetros. As leituras foram realizadas diariamente, preferencialmente às 17 horas. A Figura 7 ilustra a instalação do equipamento na área aberta da propriedade. A localização dos pluviômetros instalados nas parcelas monitoradas pode ser vista na Figura 6.

Figura 7: Pluviômetro de referência instalado na propriedade



Os resultados do monitoramento a nível diário foram totalizados a nível mensal, visando identificar correlações lineares entre as precipitações internas nas parcelas e a precipitação de referência em área aberta. O grau de interceptação da chuva pela copa das árvores foi obtido pela diferença entre a precipitação aberta e a precipitação interna. Os coeficientes angulares e lineares das retas ajustadas foram avaliados estatisticamente com auxílio da linguagem computacional R (R Core Team, 2024).

2.4. Monitoramento da umidade do solo

Para o monitoramento da umidade do solo foram utilizados sensores TDR modelo CS 616 da fabricante Campbell Scientific. Os sensores foram colocados horizontalmente nas profundidades de 10 cm e 80 cm em parede em trincheira cavada no solo sob a projeção das copas das plantas de café e posteriormente preenchidas, procurando recompor a sequência original das camadas e a densidade do solo retirado, assim como em Carvalho (2011).

Monitoraram, respectivamente, as camadas superficiais (10 cm) e subsuperficiais (80 cm) do solo. As etapas de instalação dos equipamentos são ilustradas na Figura 8. A localização dos sensores de umidade instalados nas parcelas monitoradas pode ser vista na Figura 6.

Figura 8: Instalação dos sensores de umidade em trincheira cavada sob as linhas de plantio



Amostras de solo em cilindros de 400 mm de comprimento por 100 mm de diâmetro foram colhidas e cuidadosamente levadas para o Laboratório de Física do Solo da UFV para calibração dos sensores, conforme procedimentos descritos no manual do equipamento (Campbell Scientific, 2020). Os pontos de umidade x tempo (em μs) foram ajustados por modelo linear, com auxílio da planilha eletrônica Excel. Assim, foi possível converter os resultados dos sensores em valores mais fiéis de umidade volumétrica nos sistemas agroflorestais estudados. A realização deste procedimento é importante pois a calibração padrão do aparelho é realizada em solos franco-arenosos, cujas características normalmente destoam dos solos tropicais (Pires, 2016).

Os sensores foram acoplados e operados por equipamento de controle e armazenagem de dados tipo *datalogger*, configurado para registro horário dos dados durante o período de 26/08/2023 a 07/10/2024.

Os dados a nível horário, após aplicação da equação de calibração, foram tratados para remoção de inconsistência a partir da remoção de valores espúrios com auxílio da planilha eletrônica Excel. Foram considerados valores espúrios os valores negativos e valores fora da ordem de grandeza. Quando a inconsistência ocorreu apenas em um intervalo de tempo (1 hora), precedida e seguida por valores considerados consistentes, ela foi substituída pela média dos valores imediatamente anterior e posterior. Nos casos em que as inconsistências perduraram por mais de um intervalo (> 1 hora), foi mantida a ausência de dados.

Os resultados consistidos foram tratados a partir da estatística descritiva, visando caracterizar o comportamento hídrico de cada parcela durante o ano hidrológico 2023-24. Foram utilizados valores de referência de capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) obtidos do item 3.3 do Capítulo 1 desta dissertação, apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Valores de referência de capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) para as camadas de 10 cm e 80 cm

Profundidade	CC (vol./vol.)	PMP (vol./vol.)
10 cm	0,317	0,138
80 cm	0,290	0,148

Foram calculadas curvas de permanência de umidade do solo nas camadas superficial (10 cm) e subsuperficial (80 cm), a partir da metodologia de permanência de vazões (Tucci, 1993).

Foram obtidas curvas de frente de molhamento em função da umidade média no perfil do solo. Para tal, os eventos de precipitação foram ordenados de forma decrescente, tendo sido avaliados os 20 maiores eventos de precipitação. Nesta análise, foi considerada a chegada da frente de molhamento no sensor quando este apresentou incremento de umidade igual ou superior a $0,002 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

2.5. Monitoramento da temperatura do solo e do ar

Para o monitoramento da temperatura do solo na camada superficial (10 cm) e do ar (a 1 m do solo) foram utilizados sensores de temperatura TsensDB, da fabricante Dual Base. No caso específico do monitoramento da temperatura do ar, foram construídos abrigos com garrafa PET para proteção dos termômetros da incidência solar direta, conforme Figura 9. As garrafas PET

foram envoltas por camadas triplas de fita adesiva escura, visando reduzir a incidência de radiação solar direta na ponta do termômetro, afim de reduzir eventuais valores superestimados de temperatura do ar. Freitas (2018) testou a utilização de abrigos meteorológicos de baixo custo e encontrou resultados de desvio de temperatura média inferior a 1°C em abrigos produzidos com garrafa PET contra abrigos comerciais. A localização dos sensores de umidade instalados nas parcelas monitoradas pode ser vista na Figura 9.

Figura 9: Instalação dos termômetros para monitoramento da temperatura do ar



Os termômetros foram acoplados e operados por equipamento de controle e armazenagem de dados tipo *datalogger* modelo RemoteSens DB, do fabricante Dual Base, configurado para registro horário dos dados durante o período de 26/08/2023 a 07/10/2024.

Os dados coletados a nível horário foram tratados para remoção de inconsistência a partir da remoção de valores espúrios com auxílio da planilha eletrônica Excel. Foram considerados valores espúrios os valores negativos e valores fora da ordem de grandeza. Quando a inconsistência ocorreu apenas em um intervalo de tempo (1 hora), precedida e seguida por valores considerados consistentes, ela foi substituída pela média dos valores imediatamente anterior e posterior. Nos casos em que as inconsistências perduraram por mais de um intervalo (> 1 hora), foi mantida a ausência de dados.

Os valores a nível horário foram convertidos para nível diário, sendo obtidas séries de temperaturas médias e máximas diárias do solo e do ar. A partir das séries a nível diário, foram calculadas as diferenças entre as áreas manejadas e não manejadas e a estas séries foi aplicado o teste de ruptura de Pettitt, que é um teste não-paramétrico para estimar o ponto de quebra de tendência de uma série temporal (Pettitt, 1979). Para tal, foi utilizada a linguagem computacional R (R Core Team, 2024) e o pacote “*trend*” (Pohlert, 2023). Foram aceitas as quebras identificadas com nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

Além deste teste, os resultados consistidos foram discutidos a partir da estatística descritiva, visando caracterizar o comportamento térmico de cada parcela durante o ano hidrológico 2023-24.

2.6. Imageamento multiespectral das áreas monitoradas

Além do monitoramento horário/diário das variáveis relacionadas à dinâmica hídrica e térmica das parcelas, foram realizados vôos com drones equipados com câmera de banda termal Altum-PT, do fabricante MicaSense, e câmera multiespectral com as bandas vermelho (*Red*), verde (*Green*), azul (*Blue*), borda do vermelho (*Red Edge*) e infravermelho próximo (*NIR*). Os vôos foram realizados em três momentos: antes do manejo de poda (início da estação chuvosa), no fim da estação chuvosa e no início da estação chuvosa subsequente.

Além dos resultados da banda termal, que retornam diretamente a temperatura da superfície fotografada, foram calculados os índices de vegetação NDVI, SAVI e GCVI, brevemente descritos a seguir.

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é um índice normalizado de estado da vegetação amplamente utilizado (Ahmad *et al.*, 2019) que indica a produção de clorofila por meio de um indicador numérico que vai de -1 a 1. É obtido a partir da equação:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

O SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) é um índice de vegetação normalizado similar ao NDVI. Visa reduzir problemas com saturação do índice, especialmente em ambiente de vegetação mais densa (Sishodia *et al.*, 2020). Além disso, é indicado para identificação do stress

hídrico em culturas (Marino *et al.*, 2015). É obtido a partir da equação a seguir, em que L normalmente é definido em 0,5:

$$SAVI = \frac{(NIR - Red) \times (1 + L)}{NIR + Red + L}$$

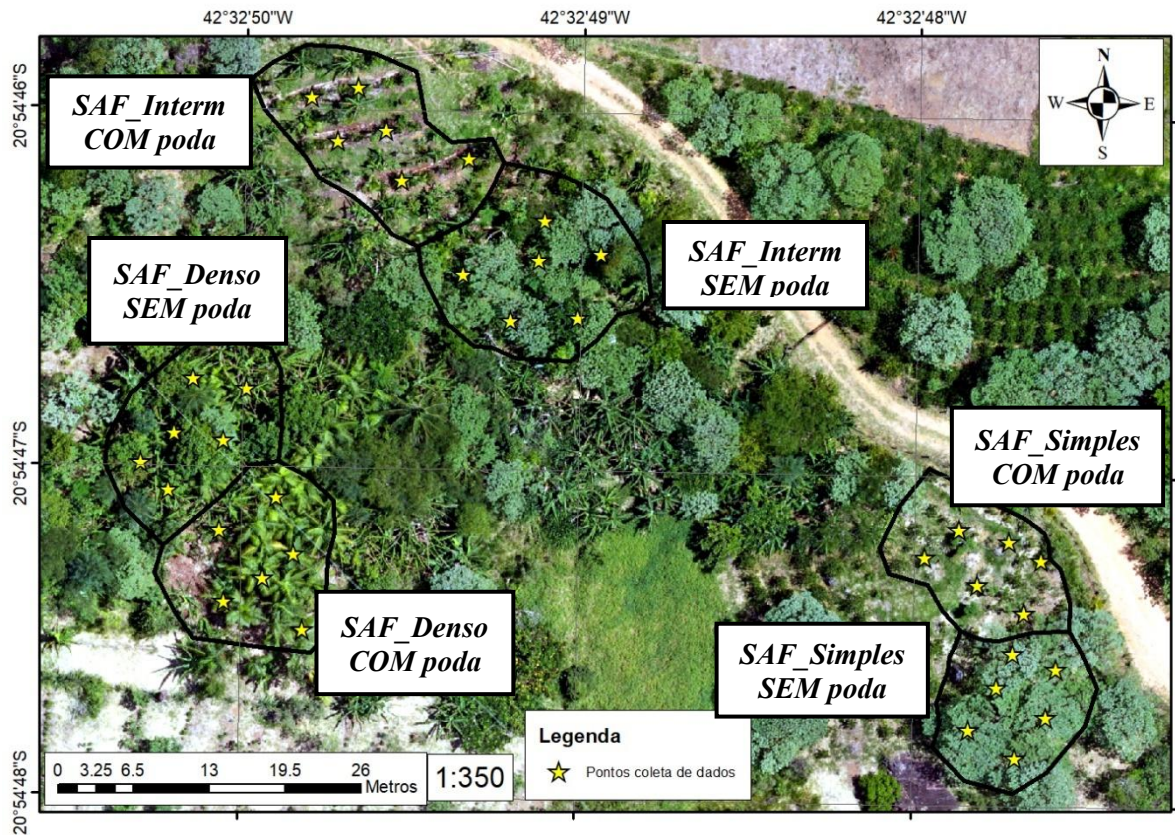
O GCVI (*Green Chlorophyll Vegetation Index*) é um índice de vegetação que busca refletir a presença de clorofila nas culturas, sendo um indicativo do Índice de Área Foliar (IAF) (Hernandez *et al.*, 2023). É obtido a partir da equação:

$$GCVI = \frac{NIR}{Green} - 1$$

As imagens foram processadas em ambiente SIG com utilização do *software* ArcGIS e da ferramenta *Raster Calculator* e os resultados tratados a partir da estatística descritiva, a partir de 6 pontos alocados sobre as linhas de plantio em cada parcela. Foi realizada uma matriz de correlação visando identificar possíveis correlações entre os índices de vegetação e a temperatura obtida com a câmera térmica. Para tal foi utilizada a linguagem computacional R (R Core Team, 2024).

Foram usados como feições de corte as delimitações apresentadas na Figura 3 apresentada anteriormente. A Figura 10 apresenta a localização dos pontos de amostragem dos índices de vegetação.

Figura 10: Pontos de tomada de dados das imagens multiespectrais



3. Resultados e Discussão

3.1. Manejo e caracterização das podas

O manejo das podas na propriedade foi realizado em formato de mutirão, nos dias 7 e 8 de outubro de 2023. Estiveram presentes 5 pessoas ao total, entre alunos de graduação, pós-graduação e trabalhadores do sítio.

O trabalho foi dividido em 2 frentes: i) derrubada de galhas e árvores e ii) processamento e organização do material podado. Na frente da derrubada de galhos maiores e árvores foram utilizadas as ferramentas motorizadas (motopoda e motoserra) e na outra, as manuais (serrote e facão). Foram realizadas podas drásticas na maioria dos indivíduos arbóreos. Em algumas exceções, foram realizadas apenas podas brandas visando a manutenção da arquitetura da copa em plantas específicas.

Foi destacada a importância da alocação do material lignificado - troncos mais grossos e galhos - em contato direto com a terra e, sobre este, o material de mais fácil decomposição como folhas

e galhos mais finos. Esta organização se faz necessária pois a camada de folhas cria um ambiente mais úmido ao redor do material lignificado, formando um ambiente mais propício à decomposição (Chen *et al.*, 2024; Miccolis *et al.*, 2016). Este tipo de manejo, em que a biomassa das podas das árvores é alocada nas linhas de plantio sendo fonte de nutrientes e atuando no controle de plantas espontâneas, é a forma mais comum de utilização do material podado em SAFs (Epagri, 2024; Rebello e Sakamoto, 2022; Miccolis *et al.*, 2016), incluindo os sucessionais (Gregio, 2020) e quão mais generosa a camada de material alocada nas linhas, maior sua contribuição para redução da evaporação direta do solo (Horton *et al.*, 1996; Chen *et al.*, 2007).

Ao longo da atividade, muitos conceitos teóricos vieram à tona, desde a decomposição do material vegetal até a dinâmica hídrica de sistemas agroflorestais, o que reforça a ideia de que na Agroecologia os conceitos de prática e ciência estão indissociados, sendo o “aprender fazendo” uma grande ferramenta de construção do conhecimento agroecológico (Nunes *et al.*, 2022). A Figura 11, por fim, ilustra o trabalho coletivo realizado.

Figura 11: Realização do manejo de podas em formato de mutirão



As árvores foram manejadas com a realização de podas drásticas, removendo-se toda a copa a uma altura de aproximadamente 2,5 m. Nas áreas do *SAF_Simples* e do *SAF_Interm*, houve uma abertura de luz expressiva para o estrato arbustivo ocupado pelo café. Já no *SAF_Denso*, onde a cultura principal já migrou para a juçara, o sub-bosque continuou relativamente bem coberto pelas copas das próprias palmeiras juçara. A caracterização da abertura do dossel após o manejo foi realizada a partir das fotografias hemisféricas, cujos resultados são apresentados na Figura 12 e na Tabela 10.

Figura 12: Abertura do dossel antes e após os manejos realizados

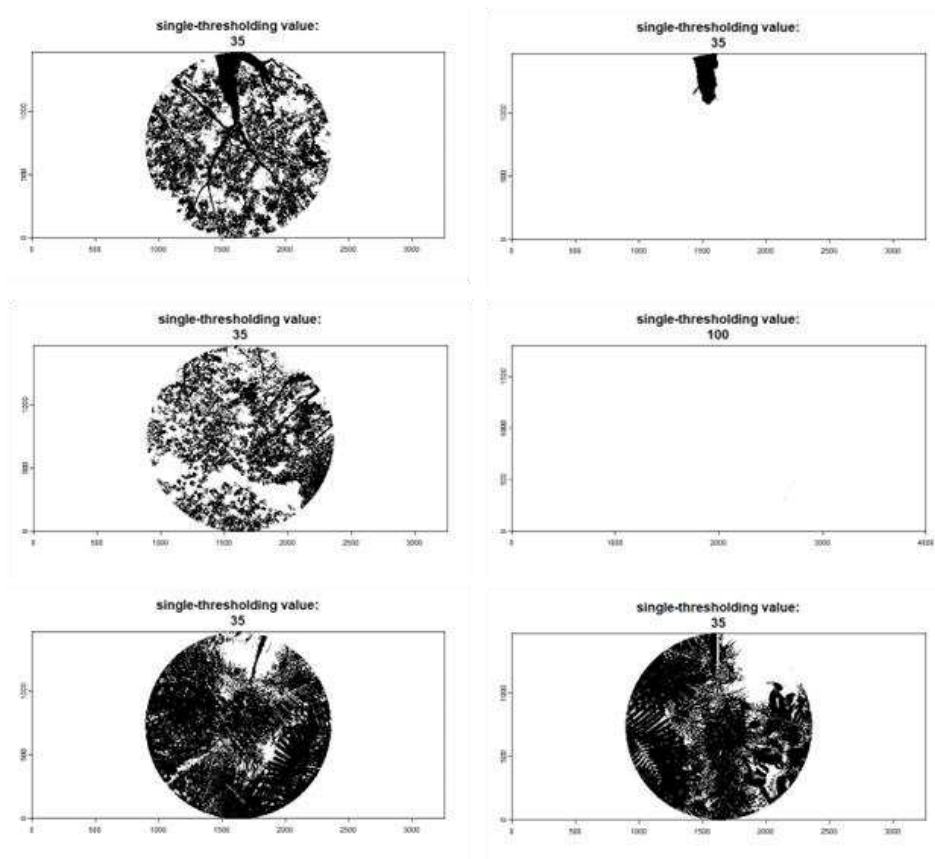


Tabela 10: Abertura do dossel antes e após os manejos realizados

Área	Abertura do dossel antes das podas	Abertura do dossel após as podas
<i>SAF_Denso</i>	17% (83% de cobertura)	25% (75% de cobertura)
<i>SAF_Interm</i>	40% (60% de cobertura)	100% (0% de cobertura)
<i>SAF_Simples</i>	43% (57% de cobertura)	97% (3% de cobertura)

Os resultados de cobertura do dossel mostram como a área do *SAF_Denso* de fato já não comporta mais a cultura do café no sub-bosque, vide que mesmo após o manejo de podas, a cobertura do dossel ainda se manteve elevada (75%) devido a presença das palmeiras juçara. Para a cultura do cafeeiro, o grau de sombreamento deve ser na faixa de 20 a 40% (Vaast *et al.*, 2004).

O sombreamento do cafeeiro pode cumprir funções distintas, desde a maturação mais lenta dos frutos, incorrendo em melhor qualidade da bebida (Vaast *et al.*, 2006), até o conforto térmico necessário para a planta, especialmente em ambientes de menor altitude (Gomes *et al.*, 2020). Este processo de substituição da cultura principal no talhão é previsto na concepção da AS e acompanha naturalmente o processo de sucessão ecológica da área, de modo que o sistema produza diferentes tipos de alimentos conforme a etapa evolutiva da área (Greggio, 2020).

Nas áreas do *SAF_Simples* e *SAF_Interm*, o grau de cobertura estava entre 57% e 60% e foi para virtualmente 0% logo após o manejo. O manejo de podas em SAFs de café com sombreamento acima de 40% é uma estratégia proposta por Lopes *et al.* (2017), que encontrou resultados de 44,4% a 76,2% de sombreamento em SAFs com café na Zona da Mata Mineira. Na área de estudo, a estratégia adotada visa garantir a maior entrada de luz e água durante o período do verão, em que as plantas normalmente apresentam maior crescimento vegetativo (Paulilo *et al.*, 2015), e manter as áreas mais sombreadas no período do inverno, protegendo os cultivos de eventuais temperaturas muito baixas à noite (Souza *et al.* 2011), e durante a maturação dos grãos de café, que ocorre no período de março a julho no local (Sakiyama, 2015). As podas das árvores em SAFs, quando realizadas nesta época, são a estratégia proposta por Jackson (2000) para reduzir as perdas por interceptação, garantindo maiores teores de umidade do solo.

O sombreamento pode ser uma estratégia para reduzir as taxas de mortalidade em plantios de árvores nativas, observando-se as faixas limitantes de cada espécie. Ainda, o manejo de podas em SAFs pode criar microambientes específicos, proporcionando novos usos ao sub-bosque, atendendo às diferentes necessidades da propriedade (Santos, 2022). É importante, então, conhecer as características de cada espécie, para que o manejo de poda consiga dar a melhor condição a cada uma delas, em termos de acesso à luz e também de competição por espaço (Miccolis *et al.*, 2016).

Na área de estudo, a implantação de mudas de palmeira juçara nas áreas estudadas ocorre sob a sombra do próprio cafeeiro de modo que a abertura drástica do dossel, tal qual realizada, não incorre em danos à juçara em formação (esta protegida pela própria linha de plantas de café). A abertura do dossel, próximo à época mais quente do ano, vai resultar, além da maior entrada de precipitação, na maior entrada de radiação solar e conseqüentemente temperatura nas parcelas, tema que será abordado nos itens subseqüentes desta dissertação.

3.2. Monitoramento da precipitação interna

O monitoramento pluviométrico a nível diário foi realizado em 333 dias, entre 07/09/2023 e 30/09/2024, resultando num nível de falha de leitura de 14,6%. Nos casos em que houve falha de leitura, a leitura acumulada foi realizada na data subseqüente, de modo a não se perder a informação da precipitação acumulada. As leituras foram enviadas por aplicativo de mensagem de celular, com as respectivas fotos (Figura 13). Foram registrados 99 dias de precipitação diferente de zero.

Figura 13: Exemplo de leituras realizadas nos pluviômetros



Figura 15: Correlações entre as precipitações internas e a precipitação aberta

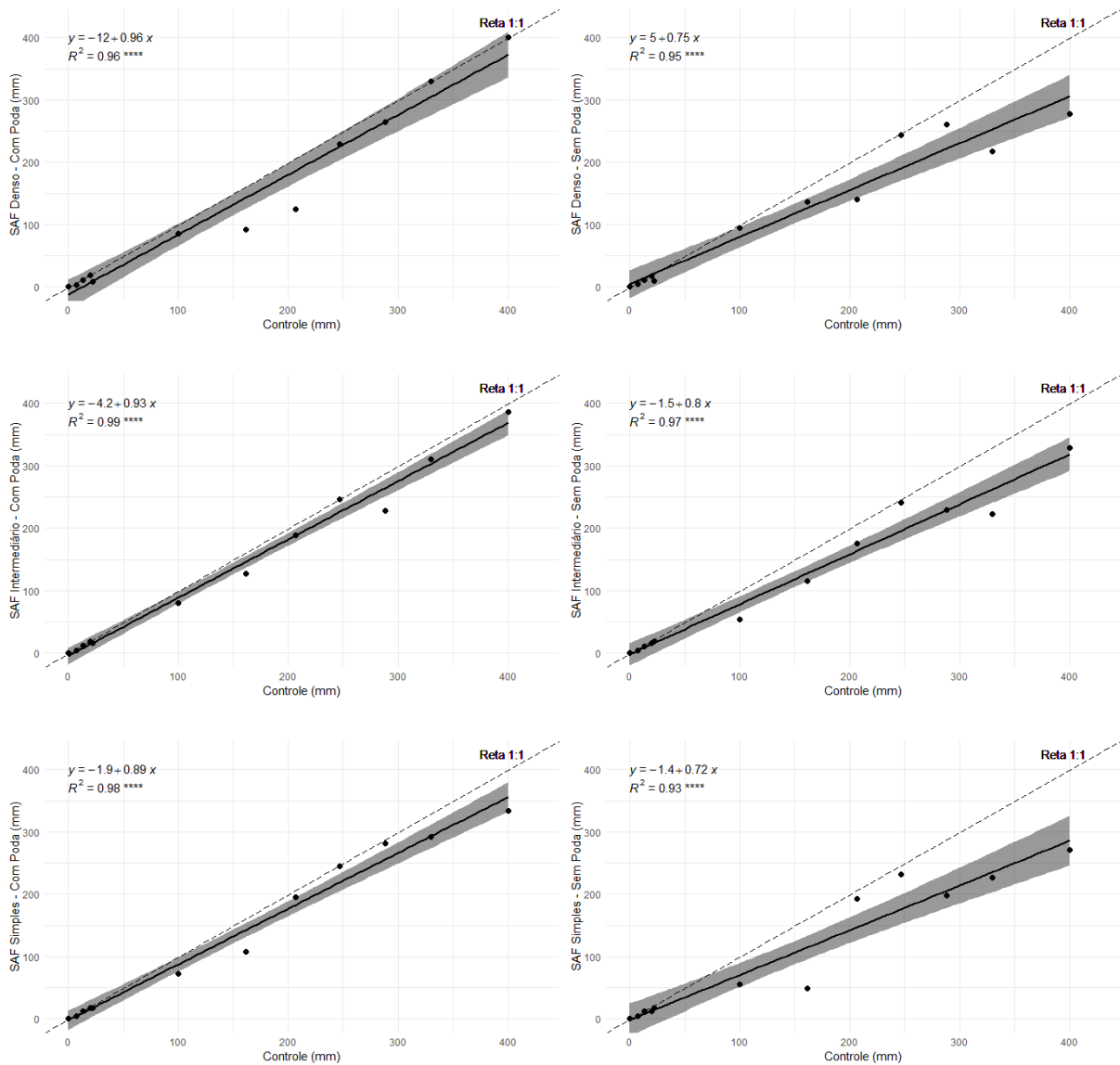


Tabela 11: Correlações entre as precipitações internas mensais e a precipitação aberta

Manejo de poda	Área	R ² ajustado	Coef. Angular	p-value	Intercepção	Coef. Linear	p-value
COM poda	<i>SAF_Denso</i>	0,96	0,96	< 0,001	4%	-12,21	0,288
	<i>SAF_Interm</i>	0,98	0,93	< 0,001	7%	-4,22	0,494
	<i>SAF_Simples</i>	0,98	0,89	< 0,001	11%	-1,90	0,792
SEM poda	<i>SAF_Denso</i>	0,94	0,75	< 0,001	25%	4,97	0,635
	<i>SAF_Interm</i>	0,97	0,80	< 0,001	20%	-1,47	0,859

Manejo de poda	Área	R ² ajustado	Coef. Angular	p-value	Intercep-tação	Coef. Linear	p-value
	<i>SAF_Simples</i>	0,92	0,72	< 0,001	28%	-1,38	0,910

Os resultados de coeficiente angular permitem a estimativa do grau de interceptação da chuva pela copa das árvores nas parcelas monitoradas, obtidos pela diferença à unidade. Nas áreas do *SAF_Simples*, *SAF_Interm* e *SAF_Denso* em que foi feito o manejo de podas no início da estação chuvosa, a interceptação foi calculada em 11%, 7% e 4%, respectivamente. Nas áreas em que foram mantidas as árvores, sem o manejo de podas, estes valores foram de 28%, 20% e 25%, respectivamente.

Os resultados encontrados nas áreas não manejadas com podas foram superiores aos de Oliveira Júnior e Dias (2005), que mediram a precipitação efetiva em um fragmento secundário de Mata Atlântica em Viçosa/MG obtendo resultados da ordem de 80% (ou seja, interceptação da ordem de 20%), e aos de Arcova *et al.* (2003), que chegaram a resultados de interceptação numa área de floresta secundária de Mata Atlântica em Cunha/SP de 18,6%. Calux e Thomaz (2012) e Niether *et al.* (2018) destacam que em alguns casos, em florestas plantadas, a interceptação pode alcançar valores maiores que da floresta nativa, incorrendo em menor recarga subterrânea de água. Na comparação entre cafeeiros em monocultura e sob SAF em Araponga/MG, Carvalho (2011) obteve uma interceptação de 33,4%, valor ainda superior ao encontrado no presente trabalho.

A precipitação é a principal entrada de água no sistema (Tucci, 1993). Após sua chegada ao solo é que se iniciam os processos de infiltração e/ou escoamento superficial. Neste sentido, a interceptação da precipitação pela copa das árvores, ao passo que pode contribuir para reduzir as taxas de escoamento superficial – e consequentemente de erosão – também incorre em menor entrada de água no solo, podendo contribuir para um déficit hídrico em SAFs frente a sistemas convencionais de cultivo (Wang *et al.*, 2017; Siles *et al.*, 2010), comprometendo a recarga de água subterrânea (Carvalho, 2011).

Destaca-se, também, o fato de que a interceptação pela copa das árvores não é constante numa mesma área. Varia conforme a intensidade da chuva, o tipo de folhas e o grau de saturação da vegetação em si. Chuvas mais intensas tendem a rapidamente saturar a vegetação, resultando em, proporcionalmente, menores taxas de interceptação. Enquanto precipitações mais brandas

podem nem chegar ao solo, ficando totalmente interceptadas nas copas das árvores (Horton, 1919; Thorud, 1963). Uma análise sobre este fenômeno é apresentada no item 3.3 deste capítulo.

A interceptação apresentou valores menores nas áreas onde houve o manejo de podas, o que mostra a sua importância para a redução das perdas por interceptação em áreas de agrofloresta. Especialmente quando o manejo é realizado logo antes ou no início do período chuvoso, promove maior entrada de água no sistema, tal como observado no estudo de Thorud (1963) e nas modelagens de Jackson (2000).

Manejos intermediários, de podas menores, que ocorrem com mais frequência em SAFs sucessionais, também podem contribuir para reduzir a capacidade de interceptação da vegetação, promovendo maior chegada de água ao solo em SAFs. Assim, possíveis déficits hídricos gerados pela interceptação (Monteith *et al.*, 1991; Siles *et al.*, 2010; Carvalho, 2011; Wang *et al.*, 2017) podem ser minimizados. Entretanto, no presente trabalho não foram feitas podas além do mutirão relatado.

O presente trabalho não contabilizou a interceptação da precipitação pelas plantas de café, o que não é negligenciável (Siles *et al.*, 2010). Assim foi feito pois considerou-se que o café era a cultura principal da propriedade, estando presente em todos os sistemas em densidade considerada semelhante. Estudos futuros com o balanço hídrico de SAFs com café na Zona da Mata devem levar em consideração esta parcela da precipitação, que afeta diretamente a chegada da água ao solo.

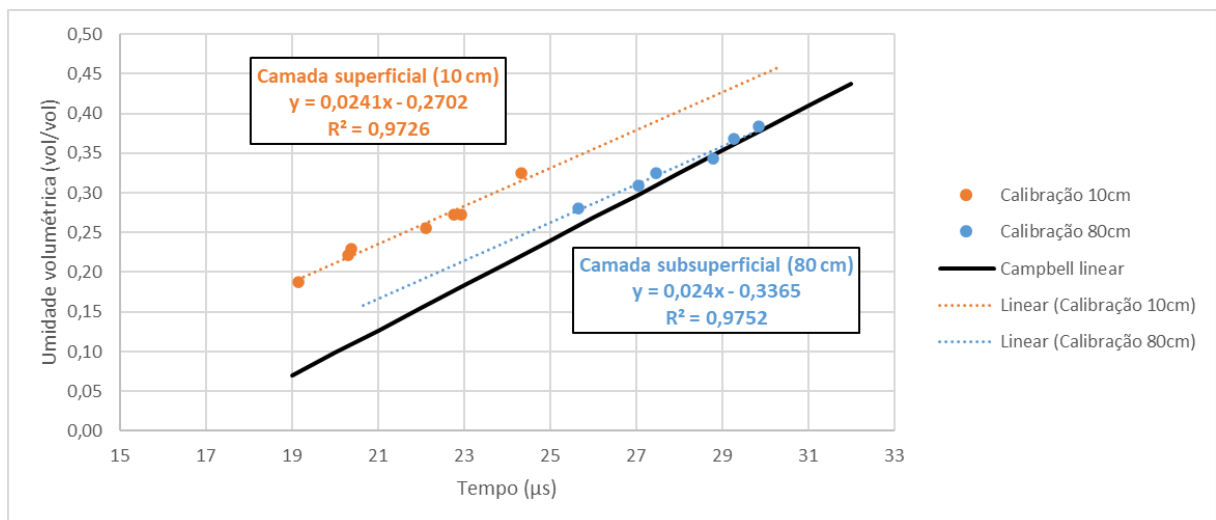
Por fim, destaca-se que quando a variável “manejo” – aqui representada pelo manejo de podas – é incluída nos estudos de SAFs, ampliam-se as possibilidades de análise e o aprofundamento sobre os processos físicos envolvidos nesse tipo de sistema, bem como sobre os benefícios promovidos por estes, indo ao encontro de Gliessman (2008).

3.3. Monitoramento da umidade do solo

A calibração dos sensores de umidade foi realizada durante 36 dias, entre 05/12/2024 e 10/01/2025. Os resultados dos pares período/tempo (em μs) x umidade volumétrica possibilitaram ótimos ajustes lineares ($R^2 > 0,97$). Os ajustes destoaram da calibração padrão do aparelho, conforme já ressaltado por Pires (2016). Tal fato se dá pela textura do solo e, por conseguinte, pela sua condutividade elétrica (CE). Solos mais arenosos, tais como os utilizados

para calibração padrão do aparelho, apresentam menor CE (Borba *et al.*, 2015), tornando mais lenta a transmissão de corrente pelo aparelho. Por este motivo, a calibração da camada superficial (10 cm) apresenta curva de resposta mais rápida que a subsuperficial (80 cm). A Figura 16 ilustra o resultado da calibração realizada. As equações lineares apresentadas foram aplicadas sobre os dados de período/tempo (em μs) obtidos dos sensores.

Figura 16: Resultado da calibração dos sensores de umidade



Os resultados da calibração sugerem uma diferença expressiva entre os resultados de CC apresentados na Tabela 6, especialmente para a camada subsuperficial (80 cm). O ponto de umidade mais elevado da calibração corresponde, em tese, ao valor da capacidade de campo do solo, quando a água para de drenar por gravidade (Rezende, 2016). Durante a calibração, estes resultados foram de $0,325 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ para a camada superficial (10 cm) e $0,383 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ para a camada subsuperficial (80 cm). Estes valores representam acréscimos de 2,4% e 32,2% nos valores encontrados anteriormente para as camadas de 10 e 80 cm, respectivamente.

A Tabela 12 apresenta o número de dados de umidade obtidos em cada parcela, após a etapa de consistência. Houve períodos de falhas do equipamento que não puderam ser identificadas a tempo da pronta correção. Além destas, destaca-se que os sensores da parcela *SAF_Interm* sem poda das camadas de 10 cm e 80 cm pararam de funcionar na data 16/03/2024 e, mesmo após manutenção dos equipamentos, não voltou a funcionar. Não foi possível realizar a substituição destes sensores, de modo que, para esta parcela, os dados cessaram antes do previsto para o

monitoramento. Os dados a nível horário de cada área estudada são apresentados nas Figuras 17 a 22.

Tabela 12: Volume de dados coletados – Umidade do solo a 10 e 80 cm de profundidade

Manejo	Área	Umidade na camada 10 cm		Umidade na camada 80 cm	
		N dados	% do período total	N dados	% do período total
COM PODAS	<i>SAF_Denso</i>	9620	98,3%	9620	98,3%
	<i>SAF_Interm</i>	9635	98,5%	9635	98,5%
	<i>SAF_Simples</i>	8808	90,0%	8808	90,0%
SEM PODAS	<i>SAF_Denso</i>	9620	98,3%	9620	98,3%
	<i>SAF_Interm</i>	4864	49,7%	4864	49,7%
	<i>SAF_Simples</i>	8808	90,0%	8808	90,0%

Figura 17: Dados de umidade coletados nas áreas do *SAF_Simples* a 10 cm

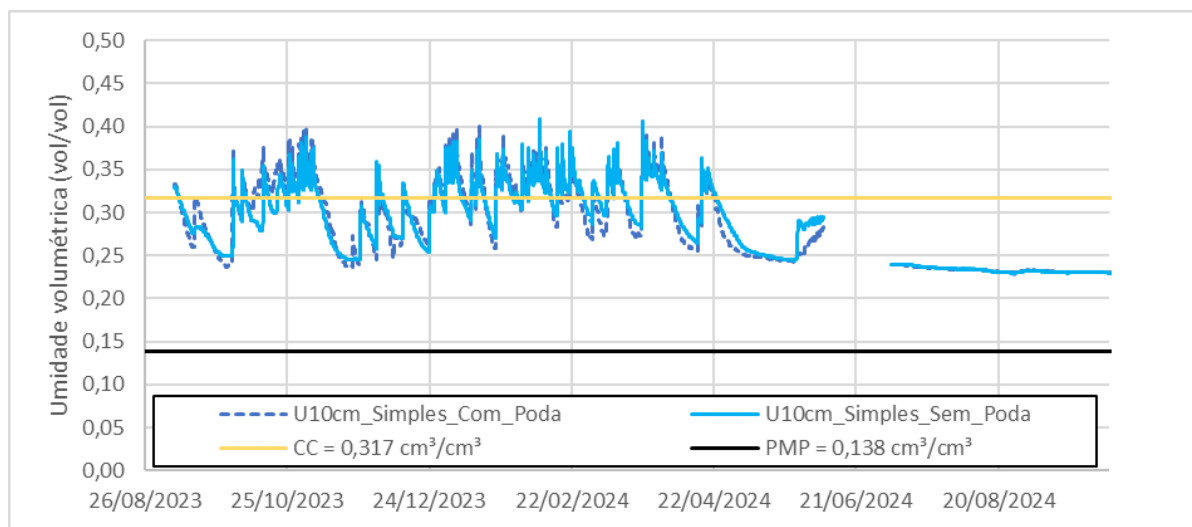


Figura 18: Dados de umidade coletados nas áreas do *SAF_Simples* a 80 cm

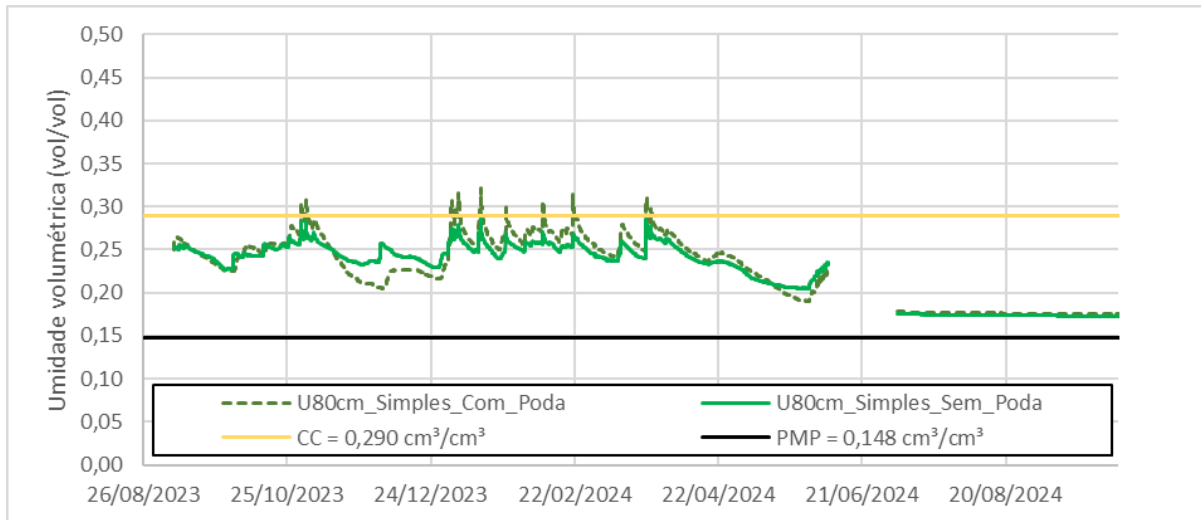


Figura 19: Dados de umidade coletados nas áreas do *SAF_Interm* a 10 cm

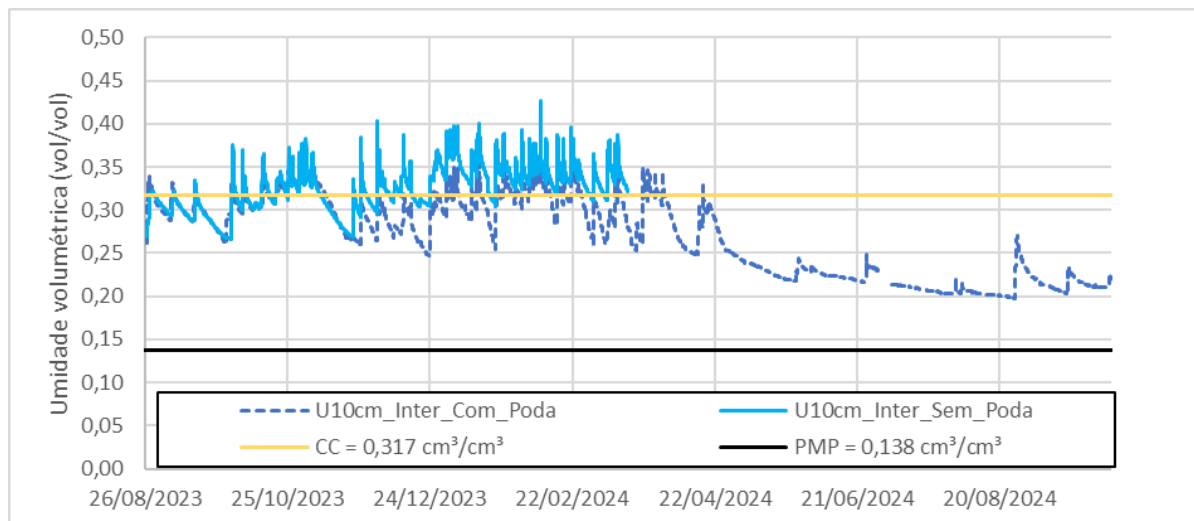


Figura 20: Dados de umidade coletados nas áreas do *SAF_Interm* a 80 cm

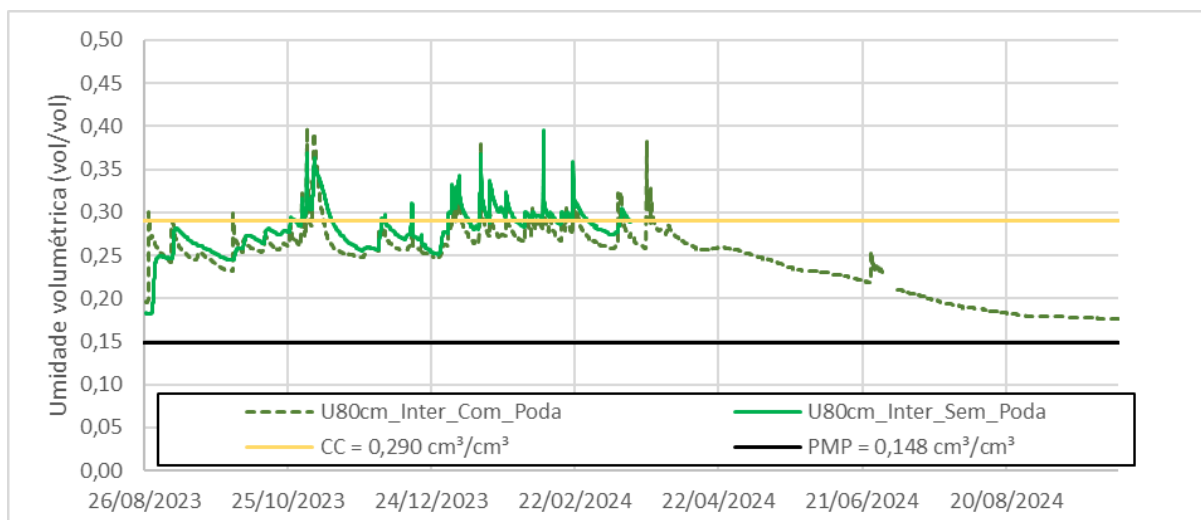


Figura 21: Dados de umidade coletados nas áreas do *SAF_Denso* a 10 cm

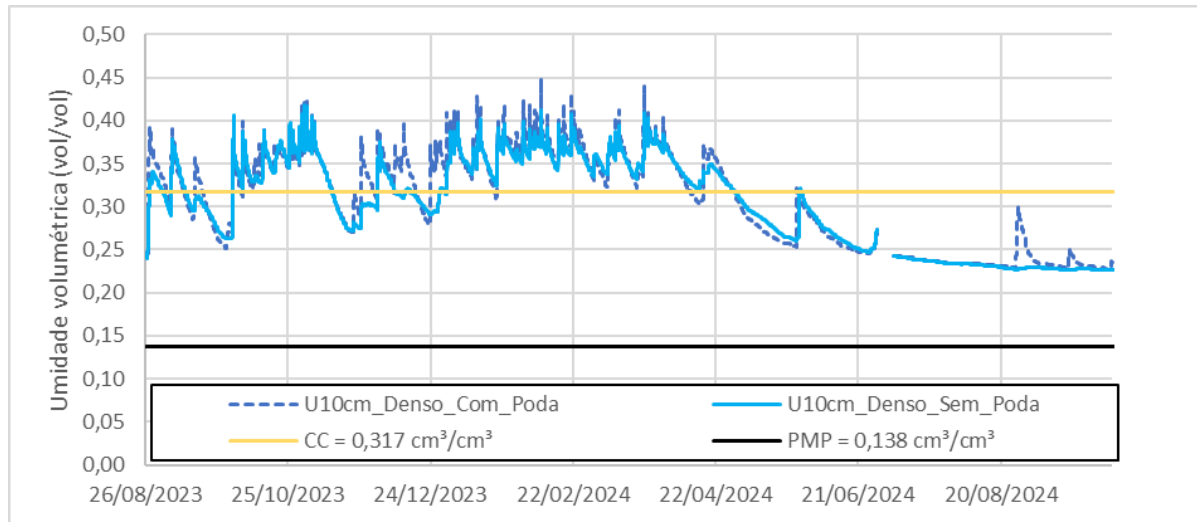
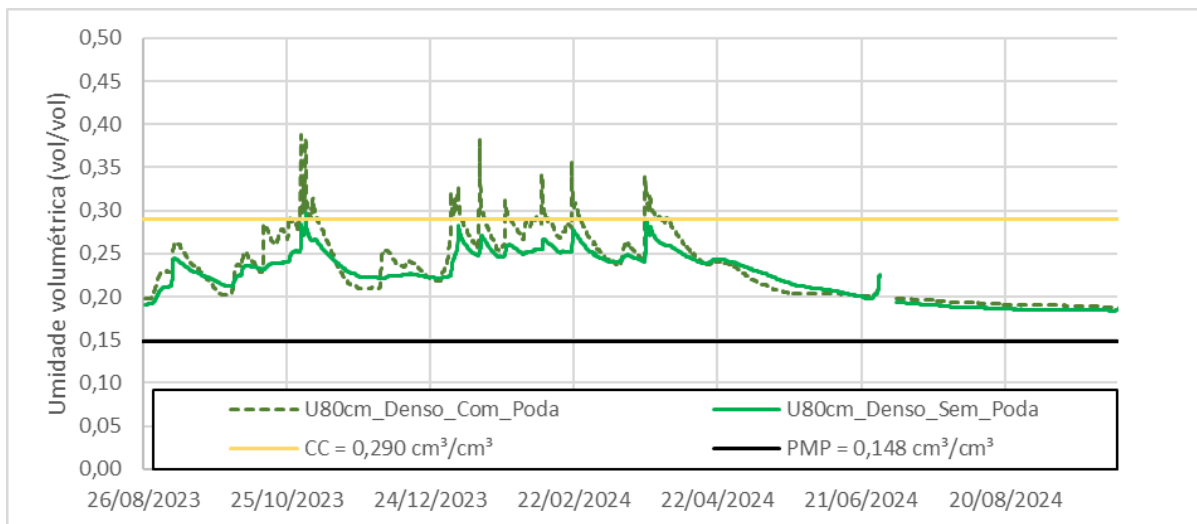


Figura 22: Dados de umidade coletados nas áreas do *SAF_Denso* a 80 cm



Os dados a nível horário foram convertidos para nível diário e, posteriormente, para nível mensal. Os valores médios de umidade do solo nas camadas de 10 cm e 80 cm, mês a mês, para as 6 parcelas são apresentados nas Figuras 23 e 24 e sintetizados nas Tabelas 13 e 14. Nas tabelas são apresentados, para cada mês, o desvio padrão observado.

Figura 23: Umidades médias mensais na camada superficial (10 cm)

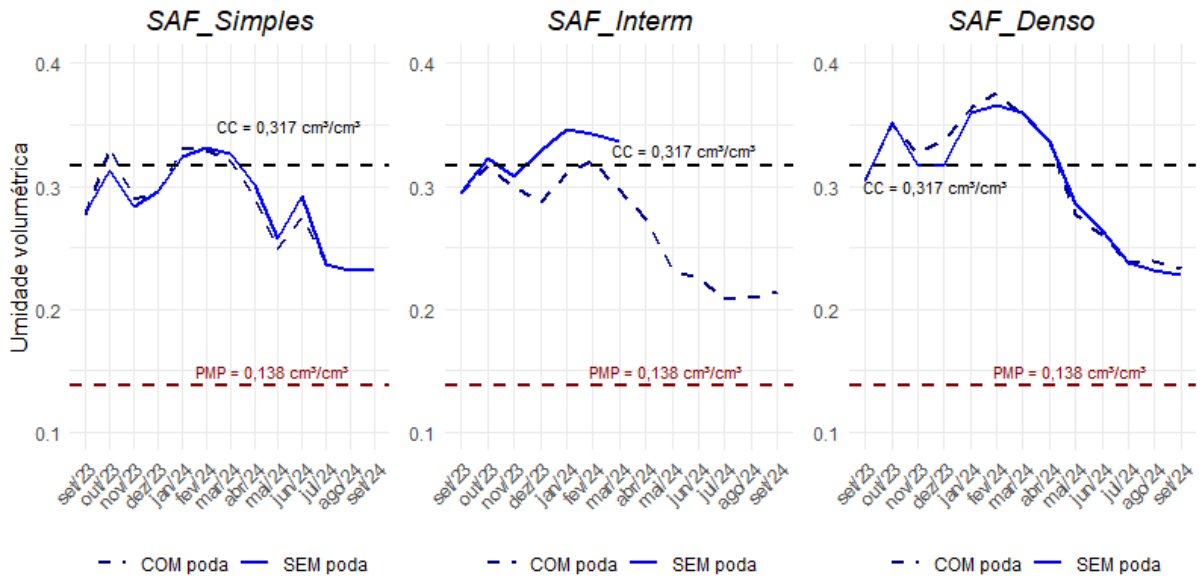


Figura 24: Umidades médias mensais na camada subsuperficial (80 cm)

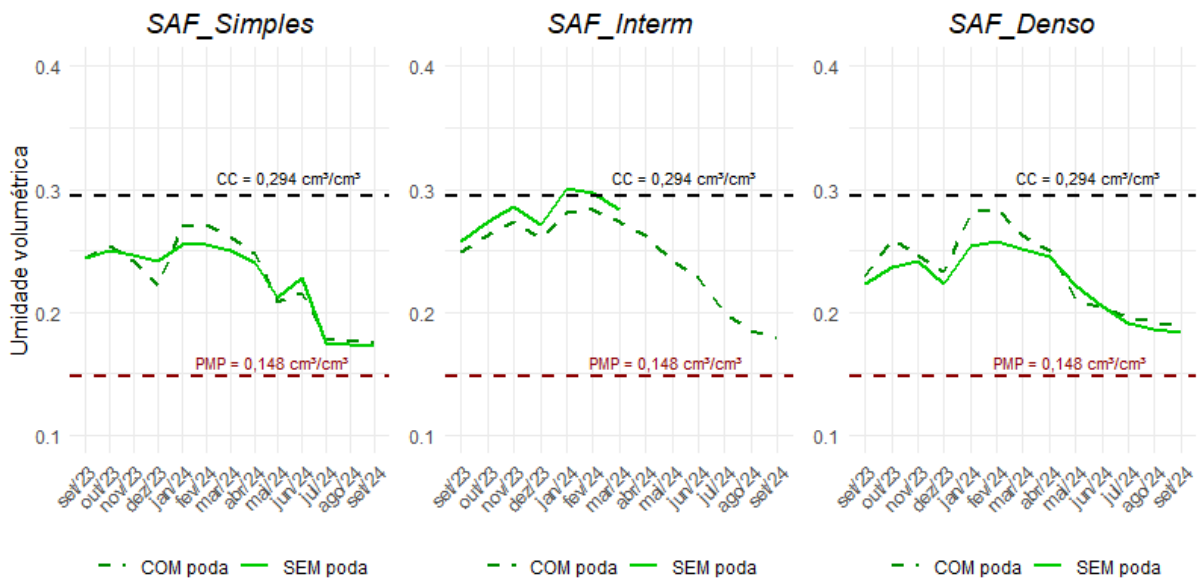


Tabela 13: Umidades médias mensais do solo a 10 cm de profundidade

Data	SAF_Denso		SAF_Interm		SAF_Simples	
	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda
set/23	0,306	0,304	0,295	0,294	0,277	0,279

Data	<i>SAF_Denso</i>		<i>SAF_Interm</i>		<i>SAF_Simples</i>	
	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda
out/23	0,350	0,353	0,317	0,323	0,332	0,313
nov/23	0,326	0,317	0,300	0,308	0,289	0,283
dez/23	0,338	0,317	0,287	0,329	0,296	0,296
jan/24	0,363	0,360	0,311	0,346	0,332	0,324
fev/24	0,376	0,366	0,320	0,342	0,329	0,332
mar/24	0,359	0,360	0,297	0,336	0,320	0,326
abr/24	0,337	0,337	0,273	*	0,291	0,301
mai/24	0,277	0,286	0,231	*	0,249	0,257
jun/24	0,260	0,264	0,225	*	0,275	0,292
jul/24	0,238	0,238	0,208	*	0,237	0,237
ago/24	0,239	0,231	0,210	*	0,232	0,232
set/24	0,233	0,228	0,214	*	0,231	0,231
MÉDIA	0,308	0,305	0,268	-	0,284	0,285

* Meses em que não foi possível quantificar as médias devido ao excesso de falhas

Tabela 14: Umidades médias mensais do solo a 80 cm de profundidade

Data	<i>SAF_Denso</i>		<i>SAF_Interm</i>		<i>SAF_Simples</i>	
	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda
set/23	0,229	0,223	0,249	0,258	0,244	0,244
out/23	0,259	0,237	0,263	0,273	0,254	0,250
nov/23	0,246	0,242	0,274	0,286	0,242	0,247
dez/23	0,233	0,223	0,260	0,271	0,222	0,241
jan/24	0,281	0,254	0,281	0,301	0,270	0,255
fev/24	0,285	0,257	0,283	0,297	0,271	0,255
mar/24	0,263	0,251	0,274	0,284	0,261	0,250
abr/24	0,250	0,245	0,262	*	0,248	0,240
mai/24	0,211	0,222	0,242	*	0,208	0,212
jun/24	0,203	0,205	0,228	*	0,216	0,228
jul/24	0,196	0,191	0,200	*	0,177	0,175
ago/24	0,192	0,186	0,185	*	0,176	0,174
set/24	0,189	0,184	0,178	*	0,175	0,173
MÉDIA	0,234	0,225	0,244	-	0,228	0,226

* Meses em que não foi possível quantificar as médias devido ao excesso de falhas

A Tabela 15 apresenta o número de medições em que cada sensor operou com relação aos valores de referência de capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP).

Tabela 15: Frequência de dados com relação aos valores de referência de CC e PMP

Manejo	Área	Acima da CC		Entre CC e PMP		Abaixo do PMP	
		N dados	% do período	N dados	% do período	N dados	% do período
10 cm	<i>SAF_Denso COM poda</i>	4841	50,3%	4779	49,7%	0	0,0%
	<i>SAF_Denso SEM poda</i>	4512	46,9%	5108	53,1%	0	0,0%
	<i>SAF_Interm COM poda</i>	1689	17,5%	7946	82,5%	0	0,0%
	<i>SAF_Interm SEM poda</i>	2955	60,8%	1909	39,2%	0	0,0%
	<i>SAF_Simples COM poda</i>	2637	29,9%	6171	70,1%	0	0,0%
	<i>SAF_Simples SEM poda</i>	2469	28,0%	6339	72,0%	0	0,0%
80 cm	<i>SAF_Denso COM poda</i>	783	8,1%	8837	91,9%	0	0,0%
	<i>SAF_Denso SEM poda</i>	3	0,0%	9617	100,0%	0	0,0%
	<i>SAF_Interm COM poda</i>	585	6,1%	9050	93,9%	0	0,0%
	<i>SAF_Interm SEM poda</i>	1625	33,4%	3239	66,6%	0	0,0%
	<i>SAF_Simples COM poda</i>	177	2,0%	8631	98,0%	0	0,0%
	<i>SAF_Simples SEM poda</i>	0	0,0%	8808	100,0%	0	0,0%

Nota-se que o volume precipitado foi suficiente para manter as umidades acima do PMP durante todo o período em todos os sistemas. Ou seja, mesmo com o consumo de água adicional provocado pela presença de árvores, não houve restrição hídrica grave a ponto das umidades monitoradas chegarem próximo do PMP. Os mínimos valores de umidade registrados foram em torno de $0,18 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ na camada de 80 cm em setembro/2024 (fim do período de estiagem) (Figuras 17 a 19). Esta umidade corresponde a uma tensão de aproximadamente -40 kPa nas condições locais (Figura 3).

Nas áreas *SAF_Simples* e *SAF_Denso* com o manejo de podas houve maior número de valores acima da CC na camada superficial (10 cm) do solo, em comparação com áreas não manejadas. Tal resultado sugere que a redução da precipitação, conforme discutido no item 3.2, de fato

resultou em maior aporte de água no solo. Nestes sistemas, houve maior permanência de umidade acima da CC também na camada subsuperficial, o que é interessante do ponto de vista ambiental. Apesar destes aspectos, as médias anuais de umidade no solo nas camadas de 10 cm e 80 cm foram virtualmente iguais entre as áreas manejadas e não manejadas, mostrando que apesar da interceptação provocada pelas árvores, a cobertura do dossel preveniu maiores perdas por evapotranspiração, contrariando os trabalhos de Wang *et al.* (2017) e Monteith *et al.* (1991). Nos referidos trabalhos são estudados sistemas simplificados, com poucas espécies envolvidas. Assim, mais uma vez destaca-se a necessidade do aprofundamento em estudos em SAFs sucessionais, sob a luz da AS, principalmente levando em conta a complexidade existente nesses sistemas e seus potenciais serviços ecossistêmicos associados.

A manutenção de valores de umidade próximos à CC se relaciona diretamente com maior possibilidade de recarga de camadas inferiores, vide que o excesso de água acima da CC escoar por gravidade pela porosidade do solo (Libardi, 2018), sendo este um aspecto desejável do ponto de vista ambiental. Do ponto de vista agrônomo proporciona maior disponibilidade hídrica para as culturas, o que também é desejável (Paulilo *et al.*, 2015).

Apesar da maior possibilidade de recarga promovida pela permanência da umidade em valores superiores à CC, destaca-se que os altos volume de dados acima da CC no monitoramento da camada superficial (10 cm) sugerem, mais uma vez, um problema com a CC obtida no levantamento das curvas de retenção de água no solo. A permanência de água acima da CC por longos períodos significa um problema de drenagem nos solos, o que não se verifica na área de estudo. Ou seja, possivelmente a CC levantada a partir da curva de retenção no ponto de -10 kPa está subestimada.

Entretanto, há de se destacar que a frequência elevada de umidades acima da CC é visualizada também nos trabalhos de Carvalho (2011) – na camada subsuperficial (100 cm) – e de Santana (2016) – na camada superficial (10 cm) -, que adotaram a mesma metodologia do presente trabalho para o monitoramento da umidade do solo e definição da CC. Algumas pesquisas com solos de regiões tropicais sugerem potenciais mátricos superiores a -10 kPa (Ottoni Filho *et al.*, 2014; Andrade e Stone, 2011), que resultam em resultados mais elevados de CC. Para a estimativa real da capacidade de campo, recomenda-se a realização da curva de retenção de água no campo, em detrimento da obtida no laboratório (Brito *et al.*, 2011). Em um sistema dinâmico, conceitos rígidos como CC e PMP podem se tornar anacrônicos (Hillel, 1979 *apud*

Rezende, 2016). Apesar destas considerações, foram mantidos como referência para discussão os valores de CC obtidos inicialmente.

Na camada subsuperficial (80 cm), nota-se um aumento da frequência de valores acima da CC em função do manejo nas áreas do *SAF_Simples* e do *SAF_Denso*. Na área do *SAF_Interm* ocorreu relação inversa, porém com valores excessivamente elevados na área sem o manejo de podas, quando comparados com as demais. Ilstedt *et al.* (2016) teorizam que há um ponto intermediário de cobertura por árvores que resulta em máxima recarga subterrânea de água em agroflorestas. Para sistemas simplificados, com poucas árvores, os benefícios de aumento da infiltração e melhora da qualidade física do solo, de forma geral, são limitados. No outro extremo, sistemas muito adensados estão sujeitos a perdas de água por interceptação e evapotranspiração que superam o ganho adicional proveniente da infiltração. Não há elementos suficientes no presente trabalho para confirmar tal teoria. Portanto assumiu-se a existência de algum efeito de sítio que contribuiu para a alta frequência de umidades acima da CC na parcela, provavelmente associada a alguma alteração de fluxo subsuperficial. Não foi possível definir o motivo que levaram a essa diferença.

Ignorando-se esta parcela, percebe-se nas demais áreas uma tendência de aumento da permanência da umidade acima da CC na camada subsuperficial (80 cm) em função do manejo de podas realizado e do estágio sucessional do sistema. Tal fato sugere, ao contrário do exposto em Carvalho (2011), uma redução do consumo de água na camada subsuperficial com o aumento da densidade de árvores. Este efeito pode ocorrer por duas formas distintas: por complementariedade na ocupação do solo pelas raízes das culturas distintas (Ong *et al.*, 2002), ou pela regulação microclimática promovida pela estratificação, que amortece a radiação solar nos estratos, reduzindo a evapotranspiração das camadas subjacentes (Lin, 2007). Este último é idealizado na concepção e no desenvolvimento da AS (Rebello e Sakamoto, 2022).

Outro ponto relevante é a obtenção de valores de umidade sistematicamente maiores na área do *SAF_Denso* em comparação com o *SAF_Simples*, tanto nas áreas manejadas quanto nas áreas sem o manejo de podas, reforçando a ideia de que a estratificação e a densidade de plantio proposta pela AS contribui para manutenção de umidade no solo (Rebello e Sakamoto, 2022). Isto se dá, principalmente, pela redução das taxas de evaporação direta do solo decorrentes da menor incidência de radiação solar e ventos (Monteith *et al.*, 1991) e pela menor pressão por transpiração das plantas do sub-bosque (Allen *et al.*, 1998).

As Figuras 25 a 28 apresentam a permanência de umidade no solo nas áreas *SAF_Denso* e *SAF_Simples* para todo o período de monitoramento. Houve maior permanência de umidade elevadas nas áreas manejadas com podas, o que pode estar associado principalmente a maior entrada de precipitação. Nestas áreas, a diferença de permanência de água entre as parcelas manejadas e não manejadas foi maior na camada subsuperficial (80 cm) do que na superficial (10 cm), indicando o efeito de saturação da primeira camada, que por sua vez promove maior percolação de água para as camadas subjacentes. Além da maior entrada de água, verificada no item 3.2, o manejo de podas contribuiu para momentaneamente reduzir as taxas de consumo de água pelas árvores, mantendo maiores teores de umidade na camada subsuperficial (Jackson *et al.*, 2000; Buyinza *et al.*, 2023). Por outro lado, a cultura sombreada que se expõe à maior radiação a partir do manejo de podas das árvores tende a aumentar seu consumo de água (Righi *et al.*, 2008; Buyinza *et al.*, 2023). A partir do momento que cessa o período chuvoso, o ganho de precipitação interna promovido pela poda se reduz, e o consumo de água transpirado pelas plantas reequilibra as parcelas no sentido de manutenção de umidades bem semelhantes entre as áreas manejadas com poda e não manejadas.

Nas áreas estudadas, os resultados sugerem que esse aumento na evapotranspiração das áreas manejadas pareceu menos significativo do que a maior entrada de água promovida pelo manejo de podas, de modo que a permanência de valores elevados de umidade principalmente na camada subsuperficial (80 cm) acima da CC se deu nas áreas onde houve a poda. Ou seja, a resultante do consumo de água pelas culturas e a maior evaporação foram menos significativas que o aporte adicional de água promovido pelas podas durante o período chuvoso.

Figura 25: Permanência de umidade no solo na camada de 10 cm - *SAF_Simples*

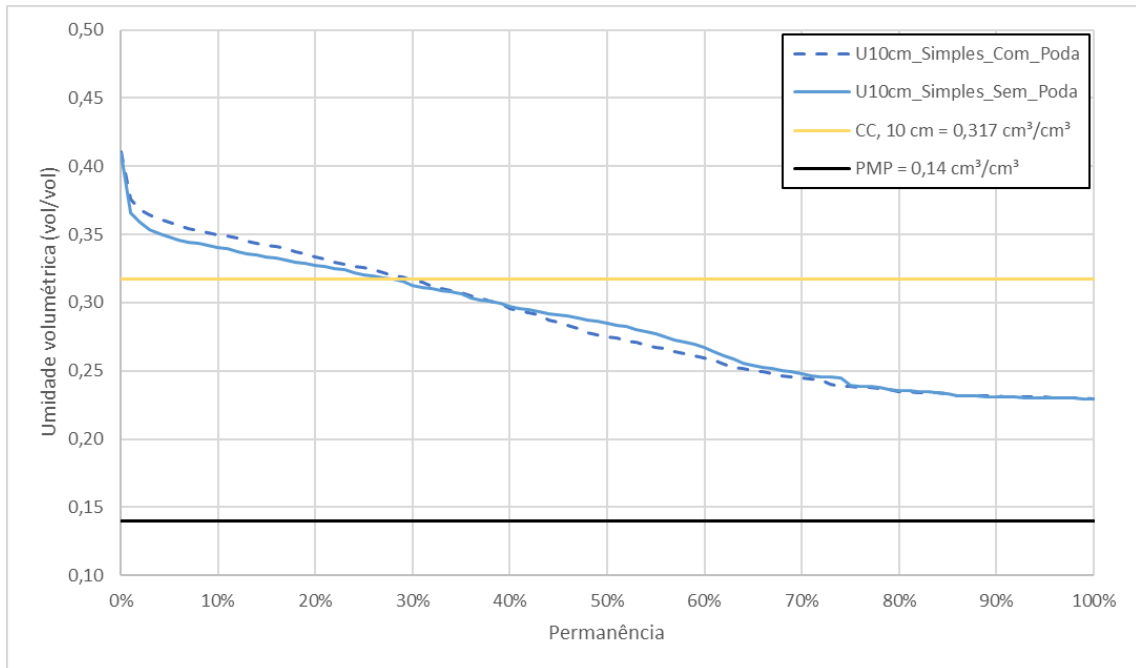


Figura 26: Permanência de umidade no solo na camada de 80 cm - *SAF_Simples*

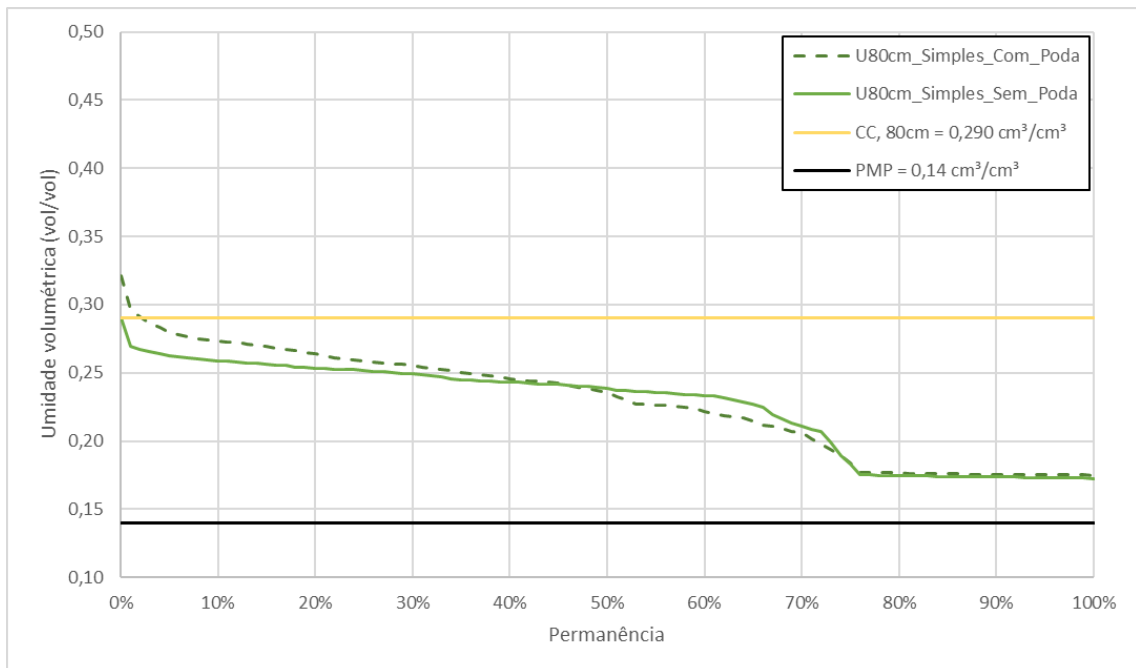


Figura 27: Permanência de umidade no solo na camada de 10 cm - SAF_Denso

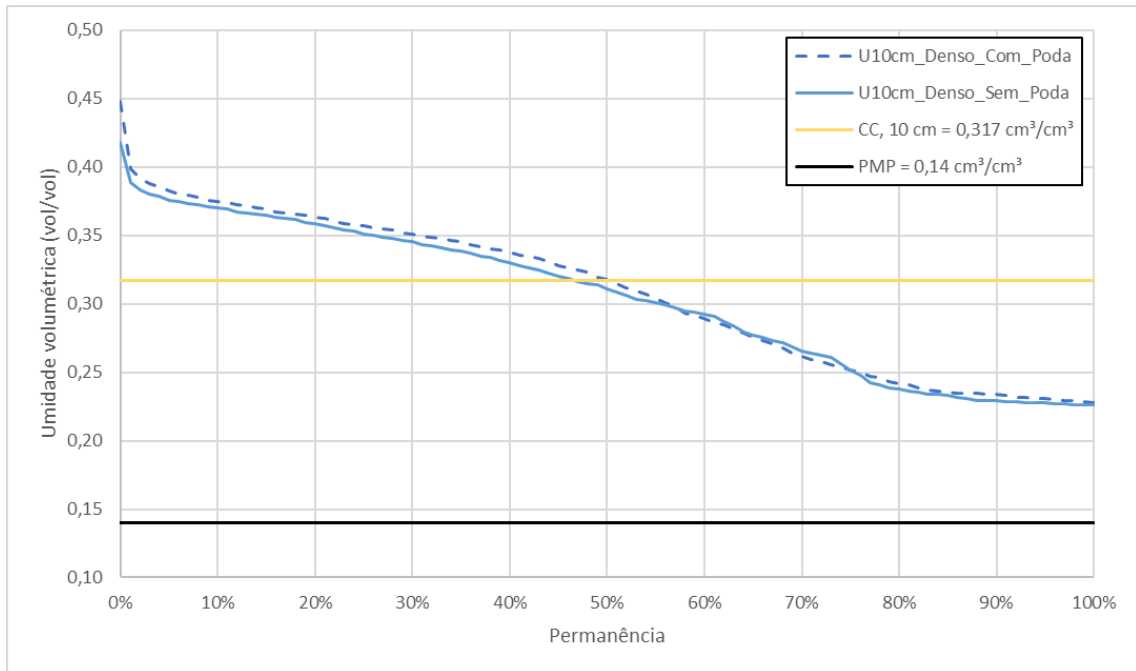
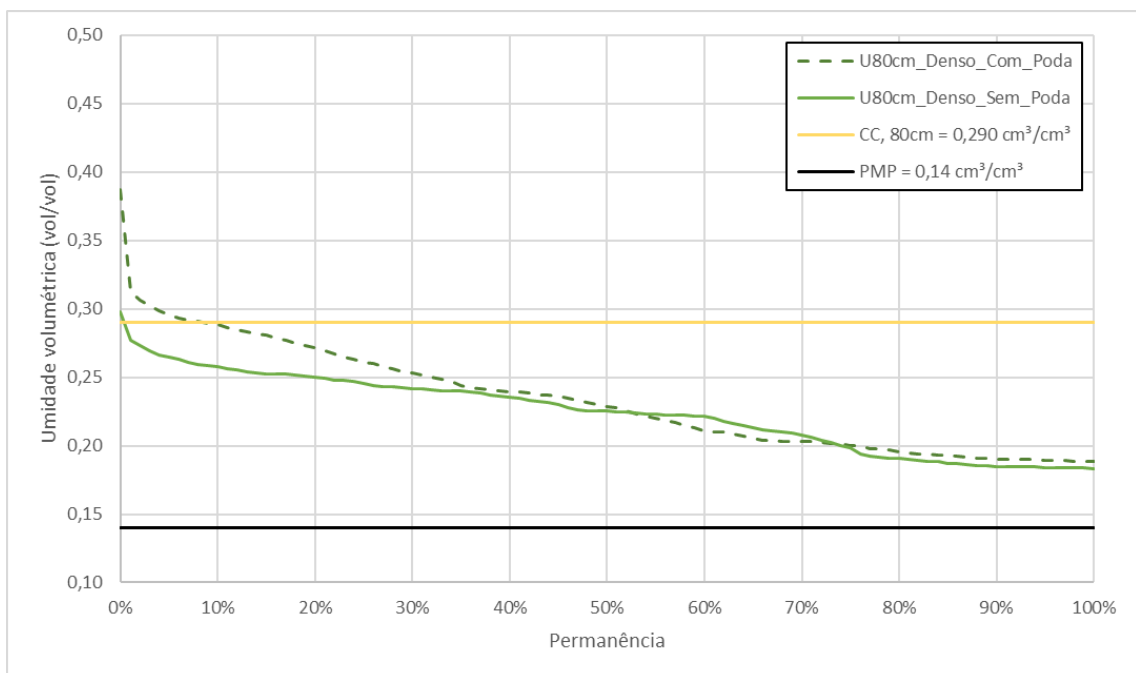


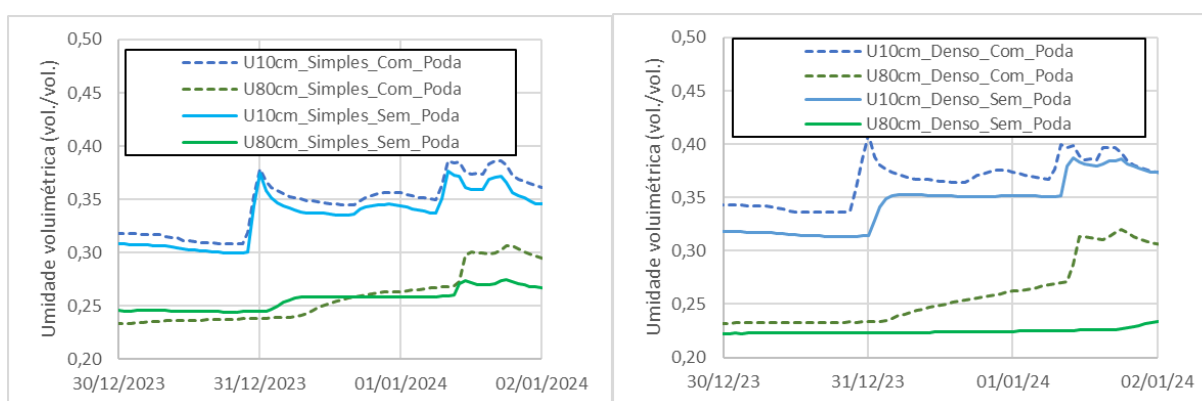
Figura 28: Permanência de umidade no solo na camada de 80 cm - SAF_Denso



Outra análise é feita com relação à dinâmica de entrada de água no solo durante um evento chuvoso pontual. A Figura 29 apresenta hidrograma de resposta típico dos SAFs - com e sem o manejo de podas - após uma sequência de 3 dias consecutivos de precipitações. Nota-se que a

elevação da umidade na primeira camada (10 cm) nas áreas manejadas é quase instantânea e mais acentuada, enquanto somente algumas horas depois ocorre elevação da umidade na área sem o manejo de podas. Isto ocorre devido à interceptação da precipitação pela copa das árvores que, além de reter parte do volume de água, retarda sua chegada ao solo (Horton, 1919). Além da camada superficial, fica visível também na camada subsuperficial (80 cm) como ocorre maior elevação da umidade após a sequência de precipitações nas áreas manejadas. A intensidade destas diferenças vai se reduzindo conforme a cobertura do dossel vai se recompondo meses após o manejo.

Figura 29: Hidrograma típico de uma série de precipitações pontuais



A partir dos registros de precipitação a nível diário, foram contabilizados os eventos de aumento de umidade no solo nas camadas de 10 e 80 cm em cada uma das áreas. Os resultados são apresentados na Tabela 16. Nota-se que o manejo de podas aumenta a quantidade de frentes de molhamento que chegam até as camadas de 10 e 80 cm nos 3 SAFs estudados. No *SAF_Denso* sem o manejo de podas, apenas 8,1% dos eventos de precipitação chegaram na camada subsuperficial contra 25,3% na área manejada, indicando o forte efeito de interceptação da precipitação pelas árvores. Nas áreas do *SAF_Interm* esta diferença foi menos expressiva (22,9% contra 30,3%) e virtualmente ausente na área do *SAF_Simples* (22,2% contra 19,2%). Esse efeito é menos expressivo na camada de 10 cm, que recebe mais de imediato a água que infiltra ao solo, corroborando os resultados vistos no item 3.2.

Tabela 16: Frentes de molhamento contabilizadas nas camadas de 10 e 80 cm

Área	SAF_Denso		SAF_Interm		SAF_Simples	
	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda
Nº eventos com dados	99	99	99	83	99	99
Camada 10 cm	70 (70,7%)	57 (57,6%)	70 (70,7%)	55 (66,3%)	66 (66,7%)	58 (58,6%)
Camada 80 cm	25 (25,3%)	8 (8,1%)	30 (30,3%)	19 (22,9%)	19 (19,2%)	22 (22,2%)

A frente de molhamento que chega na camada subsuperficial (80 cm) pode ser utilizada pelas culturas – em especial as árvores que possuem sistema radicular mais profundo (Muñoz-Villers *et al.*, 2020) –, saindo do sistema na forma de transpiração, ou percolar para camadas mais profundas, criando oportunidade de recarga hídrica (Libardi, 2018). De ambas as formas, representam ganhos ambientais desejáveis ao passo que a percolação para camadas profundas gera descarga de base na bacia hidrográfica e a transpiração das árvores resulta em aumento local de umidade do ar e produção de biomassa, que retornará ao solo através de uma poda futura.

A observação específica dos 20 maiores eventos de precipitação possibilitou a caracterização das frentes de molhamento da água no perfil do solo entre as camadas 10 e 80 cm em função da umidade média do perfil. A velocidade da frente de molhamento aumenta exponencialmente com o grau de saturação do solo (Libardi, 2018) e foi possível identificar como ela varia em função do manejo realizado. Em geral, quão maior a velocidade da frente de molhamento, maior a probabilidade de o volume d'água acessar camadas mais profundas do solo, contribuindo para a recarga hídrica dos mananciais (Owor *et al.*, 2009).

As Figuras 30 a 32 apresentam os resultados para cada SAF. Destaca-se que a velocidade com que a água percola no solo é função da textura, da porosidade e da condutividade hidráulica do solo (Libardi, 2018), mas é influenciada também pela intensidade da chuva (Owor *et al.*, 2009) e pela espessura da camada de serrapilheira sobre a superfície. A serrapilheira cumpre uma função de interceptação imediatamente sobre o solo, retardando a chegada da água no solo (Mannering e Meyer, 1963), favorecendo o fluxo de infiltração e evitando o escoamento superficial (Franco *et al.*, 2002).

O manejo de podas contribuiu para o aumento da velocidade da frente de molhamento nas 3 áreas estudadas, apontando para a maior possibilidade de recarga hídrica. Ao mesmo tempo que a abertura do dossel possibilita maior chegada de precipitação ao solo, a manutenção de maiores

teores de umidades no solo acima da CC, conforme discutido anteriormente, aumenta a velocidade da frente de molhamento criando mais oportunidade de recarga.

O *SAF_Denso* foi a área que apresentou as menores velocidades de percolação. Nesta área, houve pouca diferença entre as frentes de molhamento das áreas com o manejo de podas e sem o manejo, o que pode estar associado ao relativamente baixo grau de intervenção realizado na área, na qual foram mantidas as palmeiras juçaras no estrato alto/emergente (item 2.2). Embora não tenha sido quantificada, foi visível nesta área a maior espessura da camada de serrapilheira que, aliada à maior cobertura do dossel e estratificação, pode estar provocando estes resultados. Apesar disso, destaca-se que na parcela manejada com poda foram visualizados eventos de precipitação com frente de molhamento igual a 80 cm/h (correspondente a chegada da frente no menor intervalo de tempo de monitoramento – 1 hora).

No *SAF_Interm* foram visualizadas as maiores diferenças entre as áreas manejada e não manejada. Nesta área houve a abertura drástica do dossel e alocação do material podado nas linhas de plantio. As diferenças observadas podem indicar o efeito da interceptação da precipitação na área não manejada, visto que a espessura do material, nesta área, não foi tão robusta quanto na área do *SAF_Denso*. Neste caso fica claro como o manejo de podas contribui para aumento da recarga de camadas mais profundas do solo.

No *SAF_Simples*, ao contrário, foram visualizadas as menores diferenças entre as áreas manejada e não manejada. Tal fato pode estar associado ao rápido rebrote da capoeira branca, apresentando então influência mais significativa restrita aos primeiros meses após o manejo.

Figura 30: Caracterização das frentes de molhamento – SAF_Simples

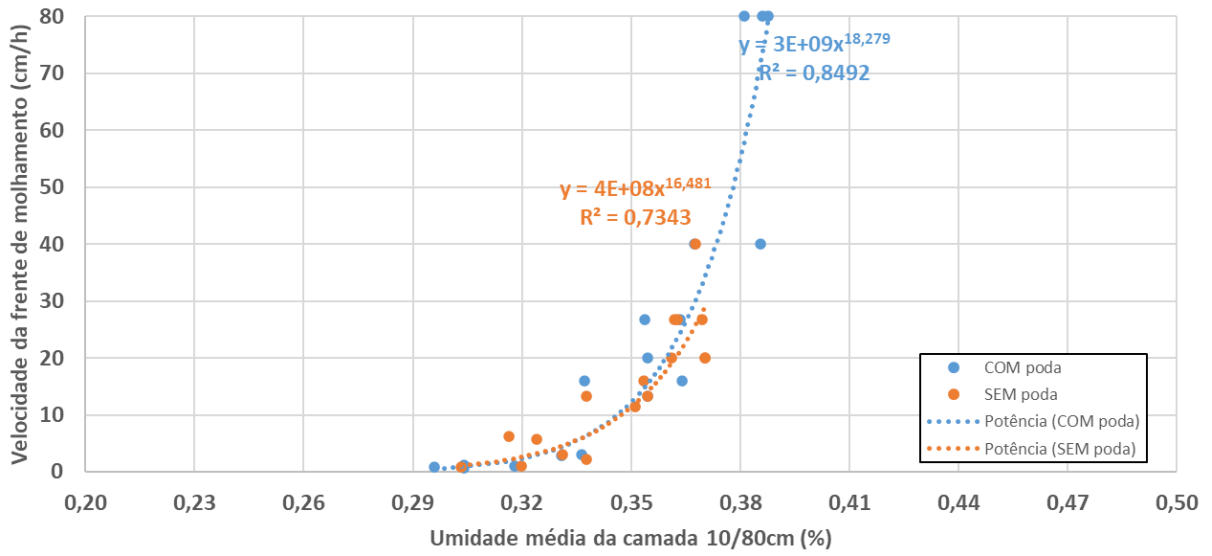


Figura 31: Caracterização das frentes de molhamento – SAF_Interm

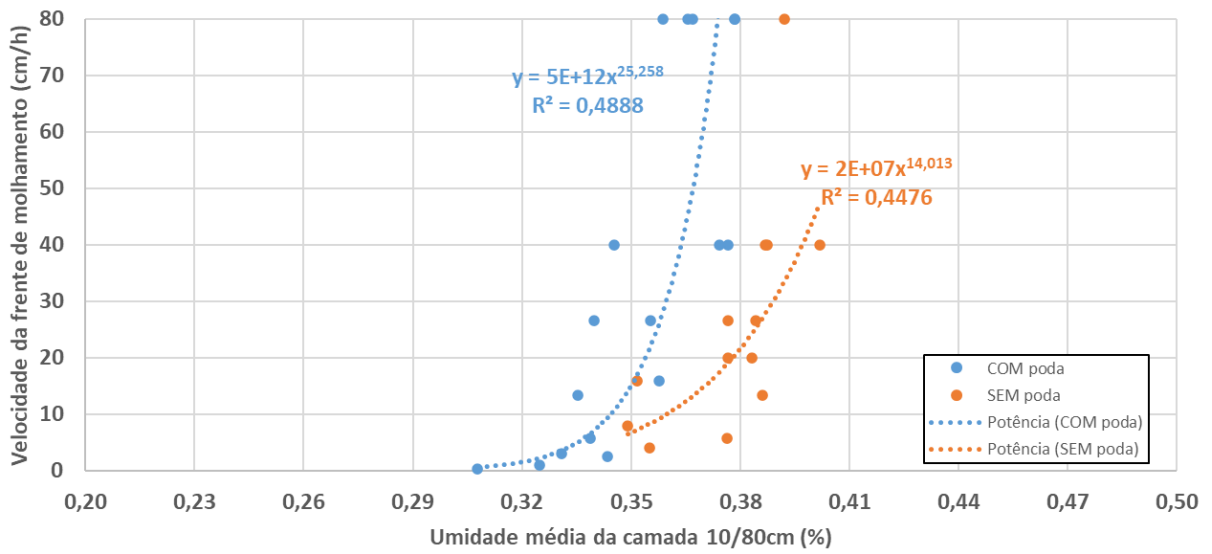
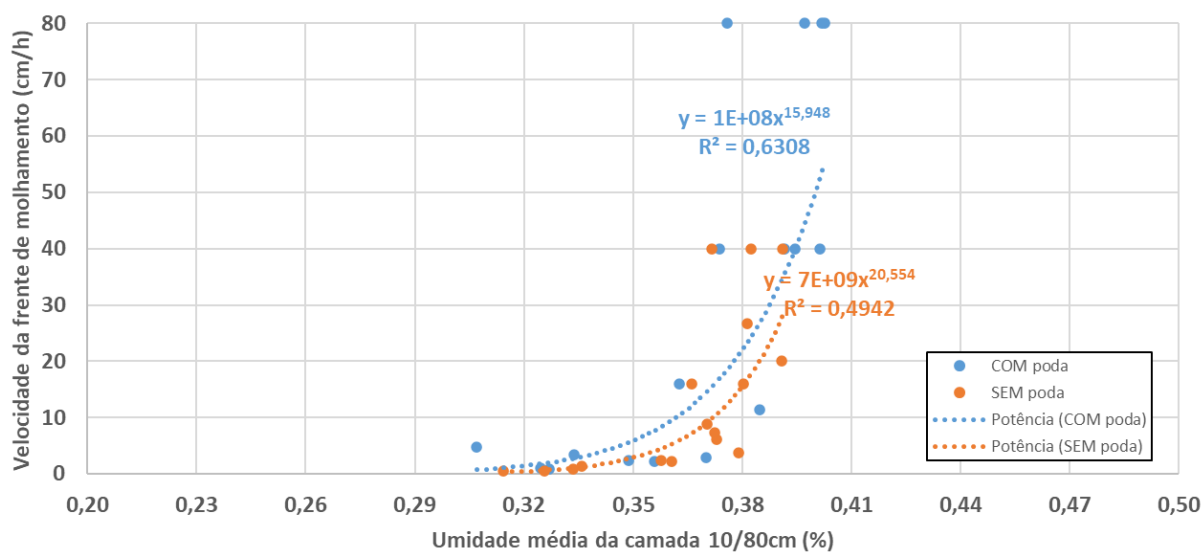


Figura 32: Caracterização das frentes de molhamento – *SAF_Denso*



3.4. Monitoramento da temperatura do solo e do ar

3.4.1. Monitoramento da temperatura do solo a 10 cm de profundidade

O monitoramento da temperatura do solo a 10 cm de profundidade foi realizado a nível horário no período de 26/08/2023 a 07/10/2024, totalizando 407 dias de monitoramento. A Tabela 17 resume o volume de dados coletados. Falhas esporádicas relacionadas à mal funcionamento dos sensores ou do *datalogger* impediram o monitoramento completo do período, com destaque para o sensor da parcela *SAF_Denso* sem o manejo de podas, que apresentou o menor número de dados coletados (6176, equivalente a 63,1% do período).

Tabela 17: Volume de dados coletados – Temperatura do solo a 10 cm de profundidade

Manejo	Área	N dados	% do período total
COM podas	<i>SAF_Denso</i>	7931	81,1%
	<i>SAF_Interm</i>	7854	80,3%
	<i>SAF_Simples</i>	9102	93,0%
SEM podas	<i>SAF_Denso</i>	6176	63,1%
	<i>SAF_Interm</i>	8306	84,9%
	<i>SAF_Simples</i>	9100	93,0%

Os dados a nível horário foram convertidos para valores médios diários e, posteriormente, para médias mensais. Os valores médios de temperatura do solo a nível diário são apresentados nas Figuras 33 a 35. Os valores médios mensais são apresentados na Figura 36 e sintetizados na Tabela 18, com seus desvios padrão.

Figura 33: Temperaturas médias diárias do solo a 10 cm – *SAF_Simples*

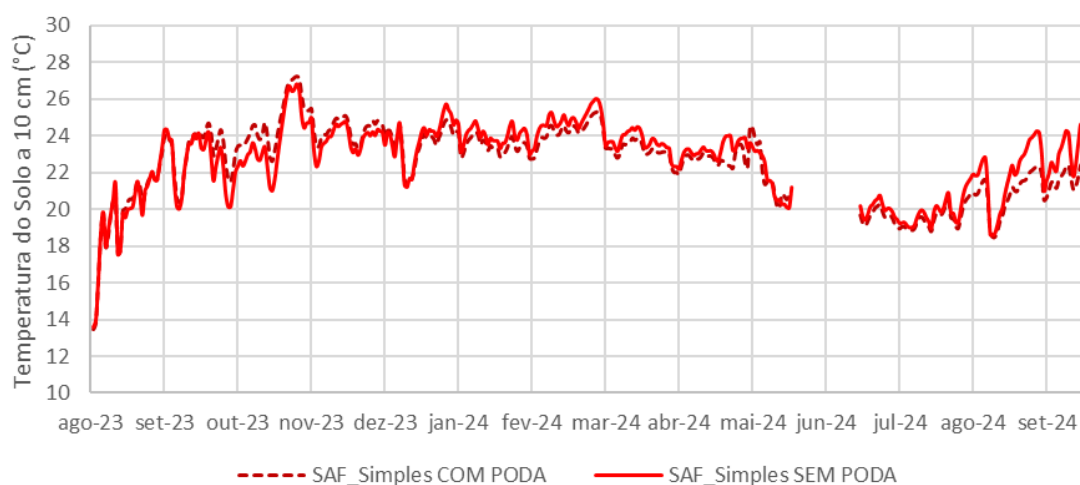


Figura 34: Temperaturas médias diárias do solo a 10 cm – *SAF_Interm*

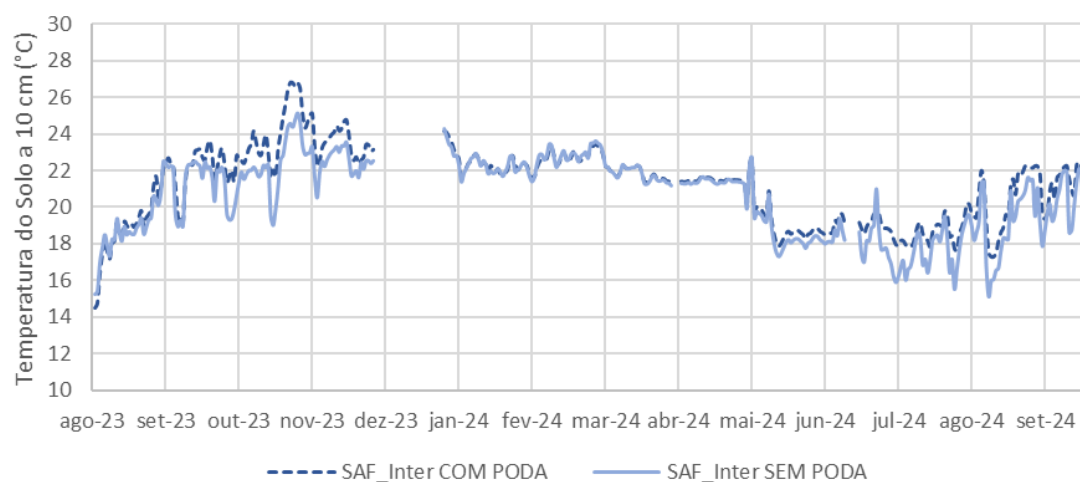


Figura 35: Temperaturas médias diárias do solo a 10 cm – SAF_Denso

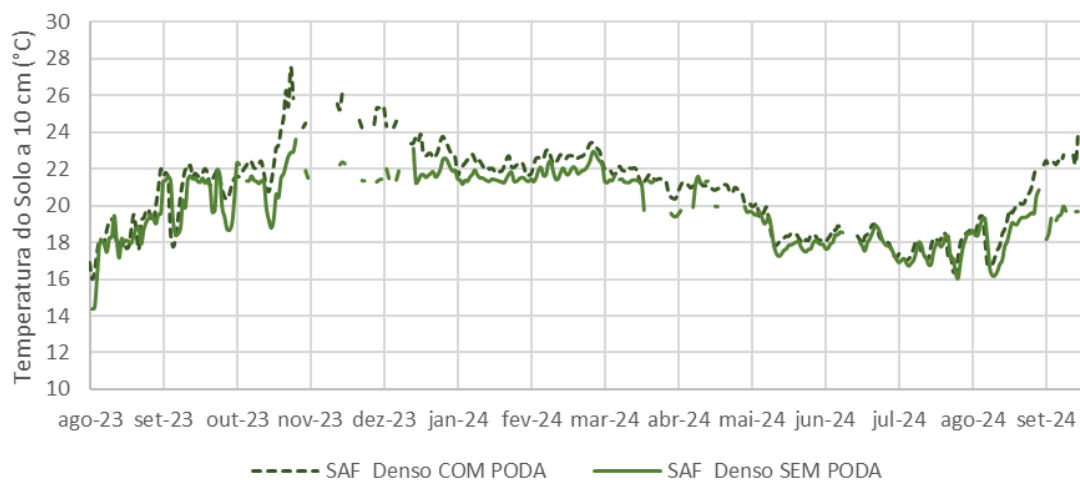


Figura 36: Temperaturas médias mensais do solo a 10 cm de profundidade

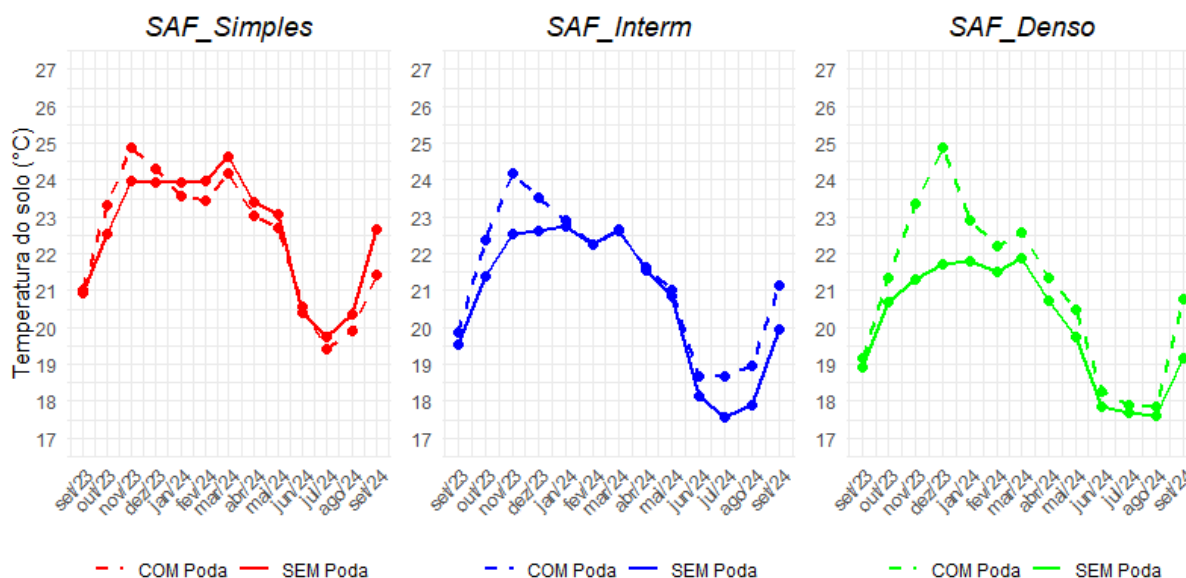


Tabela 18: Temperaturas médias mensais do solo a 10 cm de profundidade

Data	SAF_Denso		SAF_Interm		SAF_Simples	
	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda
set/23	19,16 ± 1,31	18,94 ± 1,17	19,85 ± 1,54	19,53 ± 1,48	21,02 ± 1,72	20,94 ± 1,82
out/23	21,36 ± 0,88	20,67 ± 1,19	22,38 ± 1,08	21,40 ± 1,12	23,30 ± 1,11	22,52 ± 1,23
nov/23	23,38 ± 1,90	21,30 ± 1,30	24,18 ± 1,61	22,52 ± 1,54	24,90 ± 1,38	23,97 ± 1,69
dez/23	24,88 ± 0,60	21,70 ± 0,41	23,53 ± 0,77	22,62 ± 0,59	24,31 ± 0,55	23,94 ± 0,55
jan/24	22,92 ± 0,56	21,80 ± 0,45	22,89 ± 0,76	22,76 ± 0,75	23,56 ± 0,96	23,94 ± 1,19
fev/24	22,20 ± 0,33	21,53 ± 0,25	22,24 ± 0,36	22,24 ± 0,46	23,45 ± 0,40	23,98 ± 0,50

Data	<i>SAF_Denso</i>		<i>SAF_Interm</i>		<i>SAF_Simples</i>	
	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda
mar/24	22,56 ± 0,48	21,90 ± 0,47	22,64 ± 0,50	22,67 ± 0,56	24,17 ± 0,70	24,63 ± 0,79
abr/24	21,33 ± 0,47	20,71 ± 0,86	21,65 ± 0,32	21,57 ± 0,36	23,02 ± 0,54	23,40 ± 0,65
mai/24	20,49 ± 0,73	19,73 ± 0,87	21,01 ± 0,95	20,85 ± 1,09	22,72 ± 0,86	23,07 ± 0,80
jun/24	18,28 ± 0,27	17,86 ± 0,34	18,68 ± 0,40	18,14 ± 0,40	20,56 ± 0,32	20,40 ± 0,38
jul/24	17,90 ± 0,59	17,68 ± 0,62	18,68 ± 0,56	17,57 ± 1,14	19,43 ± 0,41	19,74 ± 0,49
ago/24	17,85 ± 0,83	17,62 ± 0,95	18,96 ± 1,17	17,90 ± 1,55	19,90 ± 0,90	20,37 ± 1,23
set/24	20,78 ± 1,47	19,16 ± 0,84	21,14 ± 1,14	19,93 ± 1,31	21,42 ± 0,69	22,65 ± 1,12
MÉDIA	21,01 ± 2,13	20,05 ± 1,58	21,37 ± 1,78	20,75 ± 1,86	22,44 ± 1,71	22,58 ± 1,60

Com avanço do estágio sucessional das áreas, o dossel tende a estar mais fechado devido a maior densidade de indivíduos arbóreos e, por isso, apresentar temperaturas do solo sistematicamente menores, o que vai ao encontro de Martius *et al.* (2004), que encontrou relação direta entre a abertura do dossel em agroflorestas e a temperatura do solo. Este resultado era esperado devido ao alto grau de estratificação da área do *SAF_Denso*, que certamente permite menor chegada de radiação solar direta ao solo em comparação com as áreas do *SAF_Simples*, influenciando diretamente na temperatura do solo (Brenner, 1996).

O *SAF_Interm*, embora apresente também uma alta densidade de plantio, ainda não tinha um dossel tão fechado quanto na área do *SAF_Denso*, apresentando valores intermediários de temperatura do solo. Ainda, destaca-se o grau do manejo realizado nas áreas, em que na área do *SAF_Denso*, devido a já ocupação do estrato emergente pela palmeira juçara, não foi feita a abertura total do dossel (conforme discutido anteriormente no item 3.1). Apesar disto, no mês de dezembro/2023 – mês mais quente do monitoramento – a diferença de temperatura média mensal do solo entre a parcela podada e não podada, na área do *SAF_Denso* foi de aproximadamente 3,0°C, a maior dentre as áreas monitoradas.

Nas áreas mais avançadas – *SAF_Interm* e *SAF_Denso* – manejadas com podas, as temperaturas médias do solo se mantiveram maiores que as da parcela *SAF_Simples* sem poda durante todo o ano de monitoramento, com exceção do mês de dezembro/2023, quando a área do *SAF_Denso* com manejo de podas apresentou temperatura média superior a todas as demais parcelas. Mesmo com a maior incidência de radiação nas áreas após o manejo, a temperatura do solo nestas áreas foi menor que no *SAF_Simples* que se manteve sombreado durante todo o período.

Ou seja, SAFs simplificados, menos estratificados, mesmo que sombreados, podem apresentar menor capacidade de regulação térmica do solo que áreas mais complexas sujeitas a podas drásticas (considerando que nestas áreas o material podado será alocado sobre as linhas de plantio). Esta informação se torna ainda mais importante num contexto de mudanças climáticas, em que a temperatura média – inclusive a do solo – tende a aumentar, podendo influenciar a respiração microbiana e reduzir o estoque de gás carbônico do solo (Walker *et al.*, 2018). Tal resultado pode estar associado ao efeito da serrapilheira alocada nas linhas de plantio pois a generosa camada de biomassa alocada nessas áreas, proveniente das podas realizadas, atua como uma camada tampão que regula a temperatura do solo (MacKinney, 1929; Chen *et al.*, 2007).

A temperatura do solo na primeira camada influencia diretamente a atividade microbiológica do solo (Prevedello, 2010), responsável pela decomposição da serrapilheira (Cortez, 1997), mineralização de nutrientes (Rigby *et al.*, 2016) e respiração do solo (Gomes *et al.*, 2016). Apresenta correlação estreita com a taxa de evaporação direta do solo, apesar desta depender de inúmeros fatores dentre eles as condições acima da superfície (Qiu *et al.*, 1999). Ou seja, temperaturas do solo menores resultam em menores taxas de evaporação, sendo este aspecto desejável do ponto de vista do balanço hídrico do solo para as culturas.

Além de atuar como um tampão para a temperatura do solo, a camada de cobertura do solo proveniente do material podado também atua como uma barreira física à evaporação do solo (Chen *et al.*, 2007), sendo então um componente importante para análise do balanço hídrico local. No referido estudo, uma camada mais farta de cobertura morta reduziu a evaporação do solo em até 53%, comparada ao solo nu. Já uma camada mais fina foi capaz de reduzir a evaporação do solo em 25%. No contexto do manejo de SAFs sucessionais, embora as podas drásticas ocorram geralmente anualmente, podas menores, principalmente de galhos envelhecidos, roçadas e capinas seletivas ocorrem a todo momento. Este volume de material é incorporado nas linhas de plantio de modo a se manter, ao máximo, uma farta camada de serrapilheira que cumpra essa função de proteção do solo às oscilações de temperatura e de redução da evaporação direta do solo, visando ao máximo a conservação de umidade (Baleeiro e De Marco Jr, 2018; Rebello e Sakamoto, 2022).

A partir da aplicação do teste estatístico Pettitt foi possível identificar 2 quebras em cada uma das séries diárias de diferenças de temperatura médias diárias entre as áreas com podas e sem podas. Estes resultados são apresentados na Tabela 19. Nota-se que o teste foi capaz de

identificar com relativa precisão e significância estatística ($p < 0,05$) o manejo de podas realizado nos dias 7 e 8 de outubro, definindo como pontos de quebra datas logo após o manejo. Ou seja, há um padrão de diferença de temperatura do solo antes do manejo e outro após o manejo realizado. Os valores médios de temperatura, para cada um dos períodos (antes da 1ª quebra, entre as quebras e após a 2ª quebra) de cada área são apresentados na Tabela 20.

Tabela 19: Quebras de tendência das séries diárias de temperatura do solo a 10 cm

Área	Data da 1ª quebra	<i>p-value</i>	Data da 2ª quebra	<i>p-value</i>
<i>SAF_Denso</i>	13/10/2023	9,37E-09	15/05/2024	2,20E-16
<i>SAF_Interm</i>	11/10/2023	1,79E-13	13/12/2023	1,31E-06
<i>SAF_Simples</i>	09/10/2023	5,51E-10	25/12/2023	2,04E-06

Tabela 20: Temperaturas médias do solo a 10 cm em função das quebras de tendência identificadas

Área	Antes da 1ª quebra			Entre as quebras			Após a 2ª quebra		
	COM poda (°C)	SEM poda (°C)	<i>Dif.</i> (°C)	COM poda (°C)	SEM poda (°C)	<i>Dif.</i> (°C)	COM poda (°C)	SEM poda (°C)	<i>Dif.</i> (°C)
<i>SAF_Denso</i>	19,5	19,2	0,3	22,4	21,4	1,0	18,9	18,3	0,6
<i>SAF_Interm</i>	20,0	19,7	0,2	23,6	22,2	1,4	20,8	20,3	0,5
<i>SAF_Simples</i>	20,9	20,8	0,1	24,3	23,5	0,8	22,2	22,7	-0,5

Naturalmente, com a rebrota das árvores e o fechamento gradual do dossel durante a estação chuvosa, as diferenças de temperatura voltam a assumir comportamento similar ao anterior ao manejo, o que foi possível de ser identificado também com a aplicação do teste de Pettitt. A data da 2ª quebra identificada pelo teste de Pettitt apresenta resultados próximos entre as áreas *SAF_Simples* e *SAF_Interm*, que tiveram seus dosséis totalmente abertos após o manejo de podas, conforme apresentado anteriormente no item 3.1. Na área do *SAF_Denso*, o dossel já estava praticamente todo ocupado pelas palmeiras juçara, que não foram podadas. Assim, nesta área, a abertura do dossel foi da ordem de apenas 25% (Tabela 10). Com o dossel mais fechado,

a influência da rebrota das árvores na chegada de radiação à superfície do solo se reduz, não guardando relação direta com a 2ª quebra, que se dá somente no início da estação seca, 7 meses após o manejo de podas.

Outro ponto relevante na análise da temperatura do solo é a temperatura máxima diária em cada parcela, que pode ser atenuada tanto em função da cobertura pelo dossel quanto pela ação da camada de serrapilheira (MacKinney *et al.*, 1929; Lin, 2007). Estão associadas aos períodos mais quentes do dia, quando é maior a taxa de evaporação direta do solo. Valores muito elevados, ainda que por algumas horas, são também indesejadas do ponto de vista microbiológico pois afetam a dinâmica de respiração microbiana, podendo afetar a mobilização de nutrientes na zona das raízes e o crescimento delas (Onwuka, 2016).

Os valores máximos de temperatura do solo a nível diário são apresentados nas Figura 37 a 39. Os valores médios mensais de temperaturas máximas diárias são apresentados na Figura 40 e sintetizados na Tabela 21, com seus desvios padrão.

Figura 37: Temperaturas máximas diárias do solo a 10 cm – SAF_Simples

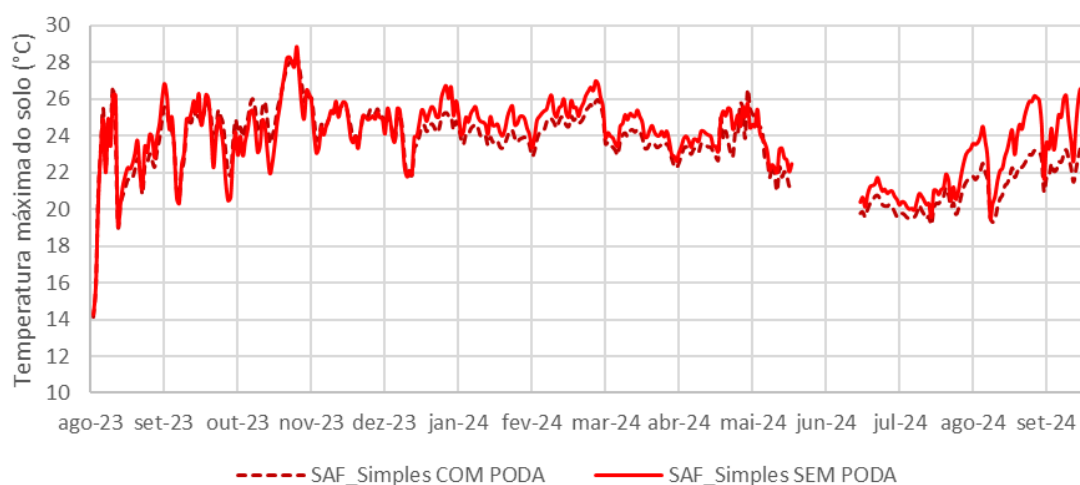


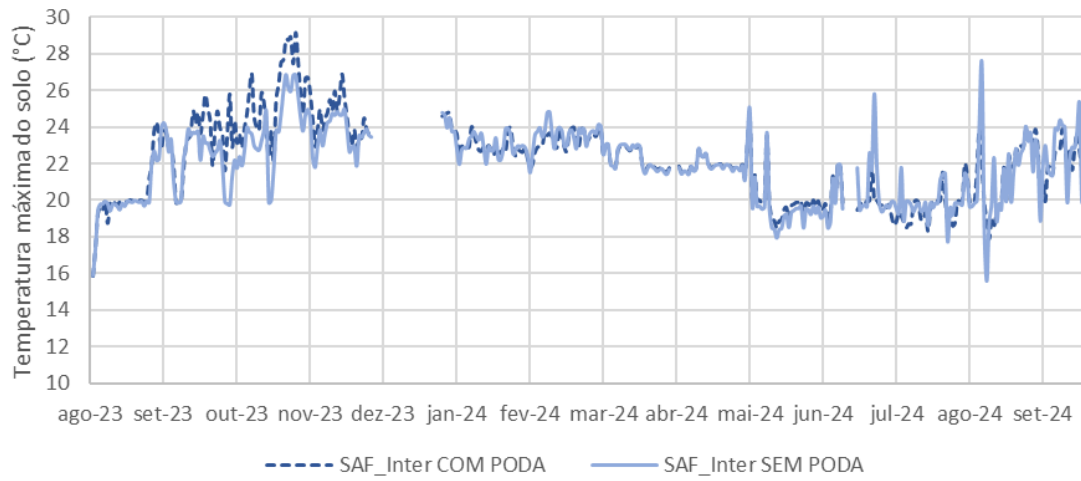
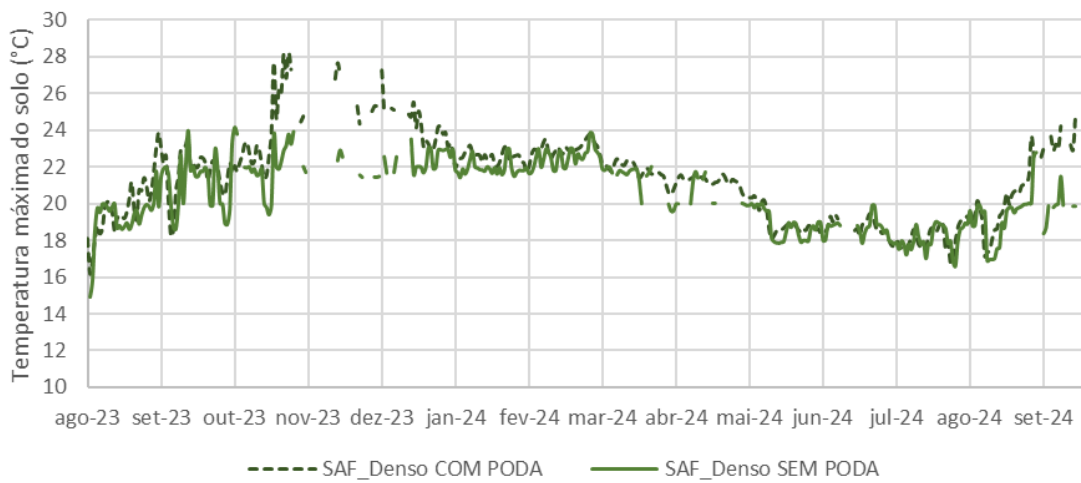
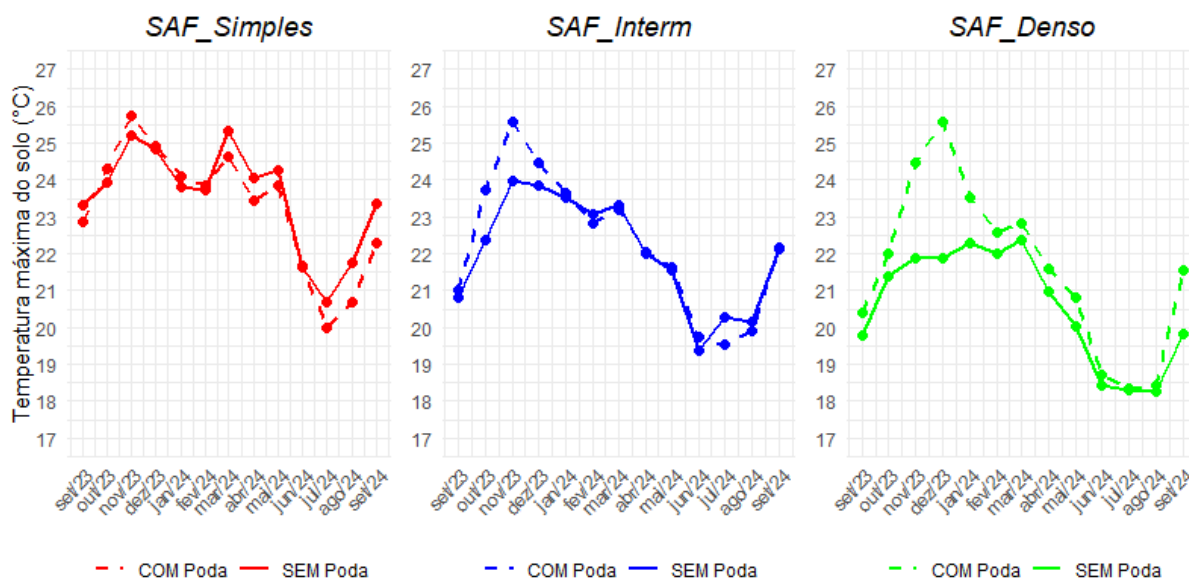
Figura 38: Temperaturas máximas diárias do solo a 10 cm – SAF_*Interm***Figura 39: Temperaturas máximas diárias do solo a 10 cm – SAF_*Denso***

Figura 40: Temperaturas máximas médias mensais do solo a 10 cm de profundidade**Tabela 21: Temperaturas médias máximas mensais do solo a 10 cm de profundidade**

Data	<i>SAF_Denso</i>		<i>SAF_Interm</i>		<i>SAF_Simples</i>	
	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda
set/23	20,39 ± 1,47	19,78 ± 1,01	21,00 ± 1,64	20,82 ± 1,55	22,86 ± 1,74	23,33 ± 1,92
out/23	21,99 ± 1,01	21,38 ± 1,54	23,74 ± 1,60	22,39 ± 1,32	24,30 ± 1,30	23,92 ± 1,67
nov/23	24,48 ± 2,32	21,90 ± 1,34	25,59 ± 2,00	23,96 ± 1,82	25,75 ± 1,45	25,22 ± 1,91
dez/23	25,56 ± 1,10	21,89 ± 0,55	24,45 ± 1,11	23,85 ± 0,85	24,92 ± 0,57	24,82 ± 0,70
jan/24	23,51 ± 0,90	22,29 ± 0,59	23,65 ± 0,79	23,53 ± 0,79	24,11 ± 0,93	23,82 ± 1,31
fev/24	22,59 ± 0,37	21,99 ± 0,44	22,83 ± 0,48	23,08 ± 0,70	23,87 ± 0,44	23,73 ± 0,57
mar/24	22,83 ± 0,54	22,39 ± 0,60	23,19 ± 0,61	23,33 ± 0,70	24,64 ± 0,81	25,33 ± 0,96
abr/24	21,59 ± 0,48	20,99 ± 0,92	22,03 ± 0,52	22,00 ± 0,59	23,43 ± 0,54	24,05 ± 0,71
mai/24	20,83 ± 0,70	20,03 ± 0,77	21,64 ± 1,21	21,56 ± 1,38	23,86 ± 1,14	24,26 ± 0,98
jun/24	18,72 ± 0,29	18,43 ± 0,45	19,73 ± 0,82	19,39 ± 0,94	21,66 ± 0,46	21,64 ± 0,53
jul/24	18,35 ± 0,57	18,29 ± 0,66	19,55 ± 0,67	20,29 ± 1,46	19,99 ± 0,37	20,67 ± 0,47
ago/24	18,42 ± 0,85	18,28 ± 0,97	19,90 ± 1,28	20,14 ± 1,99	20,70 ± 0,94	21,77 ± 1,38
set/24	21,55 ± 1,59	19,84 ± 1,14	22,17 ± 1,24	22,14 ± 1,55	22,29 ± 0,67	23,36 ± 1,27
MÉDIA	21,60 ± 2,17	20,58 ± 1,50	22,27 ± 1,81	22,04 ± 1,45	23,26 ± 1,63	23,53 ± 1,35

A partir da aplicação do teste estatístico Pettitt foi possível identificar 2 quebras em cada uma das séries diárias de diferenças de temperatura máximas diárias entre as áreas com podas e sem podas. Estes resultados são apresentados na Tabela 22. Nota-se que o teste foi capaz de

identificar com relativa precisão e significância estatística ($p < 0,05$) o manejo de podas realizado nos dias 7 e 8 de outubro, definindo como pontos de quebra datas logo após o manejo. Ou seja, assim como para as temperaturas médias diárias, há um padrão de diferença de temperatura máxima do solo antes do manejo e outro após o manejo realizado. Os valores médios de temperaturas máximas, para cada um dos períodos (antes da 1ª quebra, entre as quebras e após a 2ª quebra) de cada área são apresentados na Tabela 23.

Tabela 22: Quebras de tendência das séries diárias de temperatura máxima do solo a 10 cm

Área	Data da 1ª quebra	p-value	Data da 2ª quebra	p-value
<i>SAF_Denso</i>	29/10/2023	2,03E-03	19/02/2024	2,96E-11
<i>SAF_Interm</i>	07/10/2023	6,93E-06	25/01/2024	2,20E-16
<i>SAF_Simples</i>	13/10/2023	4,85E-04	06/01/2024	2,20E-16

Tabela 23: Temperaturas médias máximas do solo a 10 cm em função das quebras de tendência identificadas

Área	Antes da 1ª quebra			Entre as quebras			Após a 2ª quebra		
	COM poda (°C)	SEM poda (°C)	Dif. (°C)	COM poda (°C)	SEM poda (°C)	Dif. (°C)	COM poda (°C)	SEM poda (°C)	Dif. (°C)
<i>SAF_Denso</i>	20,9	20,3	0,6	23,9	22,0	1,9	20,5	19,8	0,7
<i>SAF_Interm</i>	20,9	20,8	0,1	24,7	23,5	1,3	21,5	21,6	-0,1
<i>SAF_Simples</i>	23,0	23,3	-0,4	24,9	24,4	0,5	22,9	23,7	-0,9

As datas da 2ª quebra identificada pelo teste de Pettitt apresenta resultados gradativos entre as áreas, no sentido da mais simples para a mais complexa. Na área do *SAF_Simples*, além da rápida 2ª quebra de tendência identificada, houve inversão das diferenças, com a área sem o manejo de poda apresentando sistematicamente maiores temperaturas máximas após janeiro/2024 (Figura 31). De forma geral, nota-se que o efeito das podas sobre a temperatura máxima do solo a 10 cm de profundidade se estende pelo período de 4 a 5 meses nas áreas estudadas.

3.4.2. Monitoramento da temperatura do ar a 1 m

O monitoramento da temperatura do ar a 1 m foi realizado a nível horário do período de 26/08/2023 a 07/10/2024, totalizando 407 dias de monitoramento. A Tabela 24 resume o volume de dados coletados. Falhas esporádicas relacionadas à mal funcionamento dos sensores ou do *datalogger* impediram o monitoramento completo do período, com destaque para os sensores da parcela *SAF_Denso*, que apresentaram os menores números de dados coletados (81,0% do período). Além das falhas esporádicas, o sensor da parcela *SAF_Simples* sem poda foi roçado acidentalmente durante um manejo no dia 09/05/2024, tendo sido substituído na data 06/07/2024.

Tabela 24: Volume de dados coletados – Temperatura do ar a 1 m

Manejo	Área	N dados	% do período total
COM PODAS	<i>SAF_Denso</i>	7926	81,0%
	<i>SAF_Interm</i>	8809	90,0%
	<i>SAF_Simples</i>	9106	93,1%
SEM PODAS	<i>SAF_Denso</i>	7929	81,0%
	<i>SAF_Interm</i>	8852	90,5%
	<i>SAF_Simples</i>	8427	86,1%

Os dados a nível horário foram convertidos para médias diárias e, posteriormente, para valores médios mensais. Os valores médios de temperatura do ar a nível diário são apresentados nas Figura 41 a 43. A nível mensal são apresentados na Figura 44 e sintetizados na Tabela 25, com os respectivos desvios padrão.

Figura 41: Temperaturas médias diárias do ar a 1 m – *SAF_Simples*

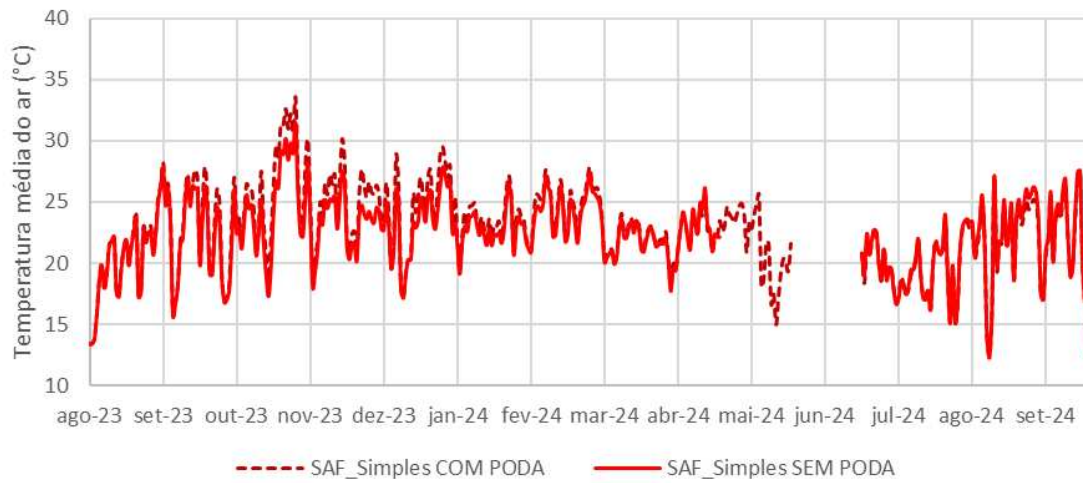


Figura 42: Temperaturas médias diárias do ar a 1 m – *SAF_Interm*

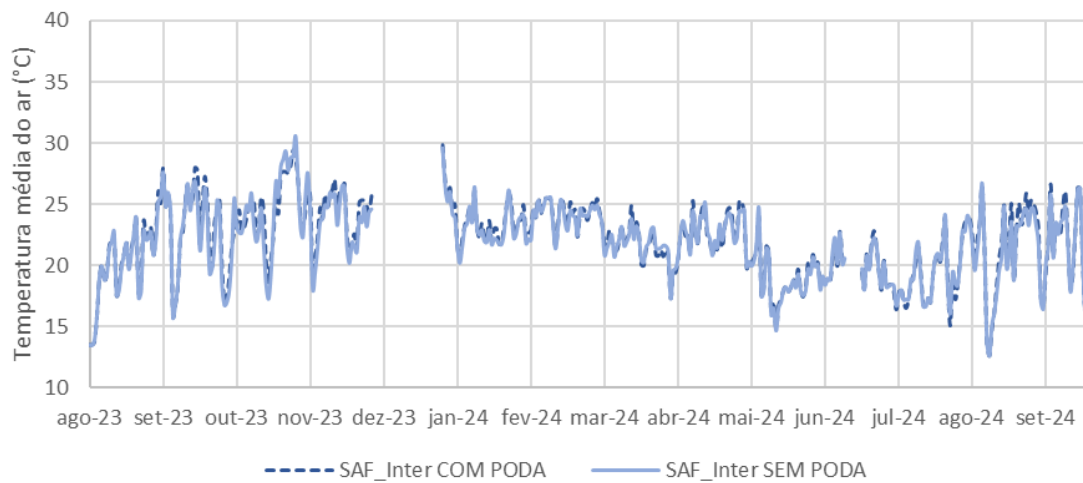


Figura 43: Temperaturas médias diárias do ar a 1 m – *SAF_Denso*

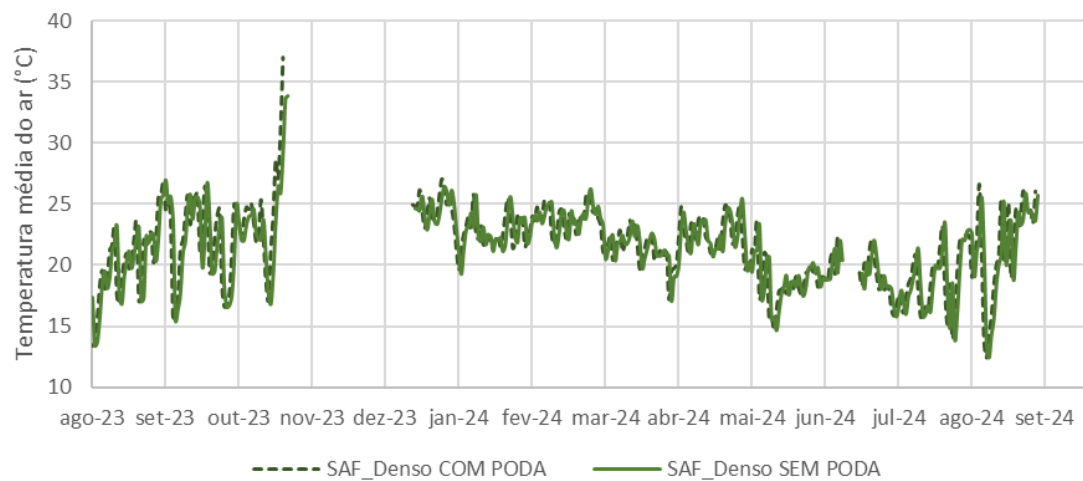


Figura 44: Temperaturas médias mensais do ar a 1 m

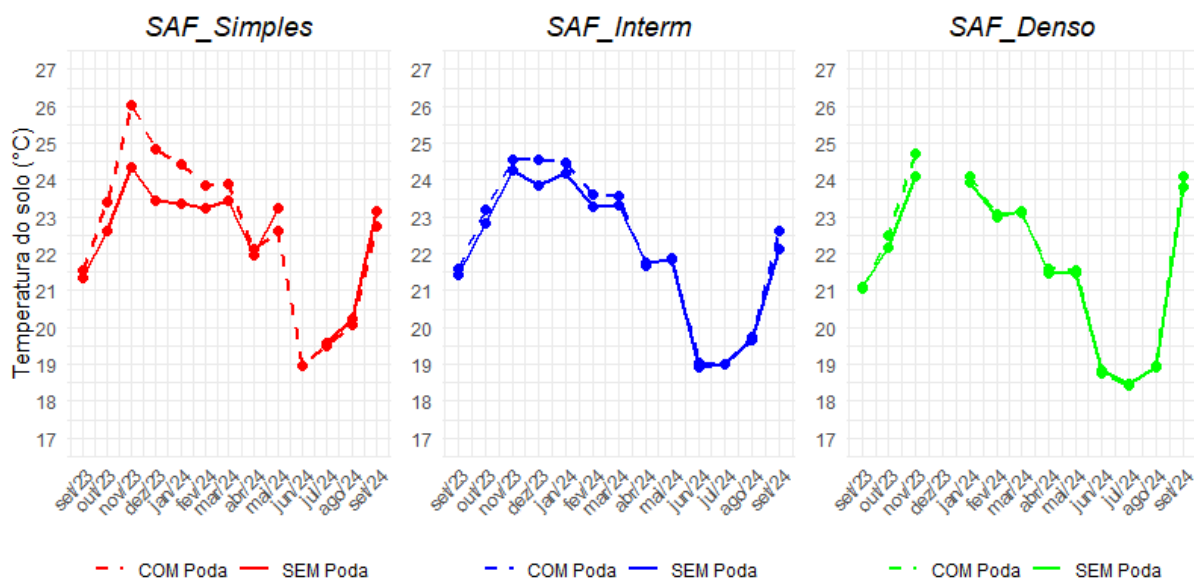


Tabela 25: Temperaturas médias mensais do ar a 1 m

Data	SAF_Denso		SAF_Interm		SAF_Simples	
	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda
set/23	21,05 ± 3,05	21,11 ± 3,06	21,60 ± 2,95	21,41 ± 2,95	21,56 ± 3,13	21,35 ± 3,05
out/23	22,50 ± 2,90	22,18 ± 2,88	23,19 ± 2,89	22,82 ± 2,97	23,41 ± 3,37	22,64 ± 3,05
nov/23	24,72 ± 5,35	24,11 ± 5,26	24,55 ± 2,88	24,26 ± 3,63	26,02 ± 4,36	24,36 ± 3,88
dez/23	*	*	24,56 ± 1,81	23,86 ± 1,92	24,85 ± 2,87	23,43 ± 2,21
jan/24	24,09 ± 1,71	23,94 ± 1,70	24,46 ± 2,34	24,17 ± 2,36	24,43 ± 2,97	23,38 ± 2,47
fev/24	23,09 ± 1,28	23,01 ± 1,22	23,59 ± 1,28	23,29 ± 1,38	23,85 ± 1,81	23,22 ± 1,71
mar/24	23,13 ± 1,43	23,15 ± 1,46	23,57 ± 1,34	23,32 ± 1,39	23,90 ± 2,19	23,46 ± 2,10
abr/24	21,58 ± 1,49	21,46 ± 1,54	21,67 ± 1,62	21,75 ± 1,44	22,11 ± 1,35	21,95 ± 1,44
mai/24	21,55 ± 2,45	21,46 ± 2,45	21,89 ± 2,42	21,83 ± 2,44	22,64 ± 2,29	23,23 ± 1,64
jun/24	18,76 ± 1,42	18,82 ± 1,47	19,03 ± 1,60	18,94 ± 1,67	18,97 ± 2,20	*
jul/24	18,44 ± 1,71	18,47 ± 1,69	19,01 ± 1,74	19,01 ± 1,68	19,51 ± 1,72	19,57 ± 1,78
ago/24	18,95 ± 3,32	18,94 ± 3,35	19,75 ± 3,34	19,68 ± 3,24	20,09 ± 3,47	20,23 ± 3,57
set/24	24,12 ± 2,80	23,81 ± 2,67	22,63 ± 2,69	22,12 ± 2,47	22,74 ± 2,53	23,16 ± 2,79
MÉDIA	21,83 ± 2,09	21,71 ± 1,96	22,27 ± 1,92	22,03 ± 1,79	22,62 ± 2,05	22,50 ± 1,38

* Meses em que não foi possível quantificar as médias devido ao excesso de falhas

Conforme observado, as variações de temperatura do ar entre as áreas manejadas com poda e não manejadas com poda foram mais sutis do que as de temperatura do solo (item 3.4.1). Isto

se explica pela maior mistura de ar acima da superfície do que junto a ela (Monteith *et al.*, 1991). Apenas a área do *SAF_Simples* com o manejo de podas apresentou valores mais elevados que as demais, especialmente nos 2 meses imediatamente após a poda. Ainda assim, algumas discussões são encaminhadas a seguir.

Gosme *et al.* (2016), avaliando a temperatura do ar em SAFs na França, destacam que a redução da oscilação de temperatura diurna em SAFs é mais pronunciada na primavera – quando as árvores possuem folhas. Assim, associa-se o efeito tampão da temperatura do ar à cobertura do dossel. No contexto da AS, as podas então reduzem a regulação térmica promovida pelas árvores. Este efeito é temporário, regredindo conforme as copas das árvores vão se reestabelecendo.

No presente trabalho não foi possível realizar o monitoramento térmico contínuo da área de referência (pastagem), sem sombreamento algum. Porém pesquisas com SAFs de café contra sistemas convencionais de cafeicultura apontam reduções nas temperaturas médias do ar de aproximadamente 4°C (Gomes *et al.*, 2016), chegando até 10°C nas horas mais quentes do dia (Melotto *et al.*, 2009). Considerando que as diferenças médias entre as áreas manejadas e não manejadas foram inferiores 4°C, pode-se inferir que as podas drásticas, apesar de reduzirem temporariamente a cobertura do dossel, não suprimem completamente os benefícios à regulação térmica proporcionada pelos SAFs frente cultivos a pleno sol.

Em SAFs voltados para produção de café arábica, especificamente, o manejo de podas deve observar o estágio fisiológico da cultura, que é sensível a temperaturas elevadas, com interrupção da fotossíntese acima de 34°C (DaMatta *et al.*, 2018). Em épocas de seca (inverno), se combinada com estas temperaturas elevadas, podem levar a cultura a stress hídrico, comprometendo a produtividade da cultura (Siles *et al.*, 2010).

Em termos de temperatura média do ar, o cafeeiro arábica possui faixa ótima entre 18°C e 23°C (DaMatta *et al.*, 2018). Nas áreas estudadas, o manejo de podas, mesmo realizado logo antes da época mais quente do ano, alterou a temperatura média anual em menos de 0,3°C. Nos meses mais quentes do ano, logo após a poda, as diferenças médias se mantiveram inferiores a 2°C, tendo o valor mais alto sido observado em novembro/23, na área do *SAF_Simples*. Certamente a menor densidade e estratificação de árvores nesta área contribuiu para maior chegada de radiação solar, incorrendo em maiores temperaturas. Ou seja, novamente reforçando a ideia de que sistemas mais complexos apresentam maiores benefícios ambientais às culturas.

Para além do conforto térmico promovido à cultura do cafeeiro pelos SAFs, a temperatura do ar influencia diretamente os processos de evapotranspiração das plantas. Temperaturas mais altas elevam a capacidade do ar em reter vapor d'água, aumentando a pressão de vapor saturado e acelerando a transpiração das plantas (Allen *et al.*, 1998). O aumento de transpiração promovido por temperaturas superiores aos limites fisiológicos das culturas incorre em perda hídrica, visto que a água consumida pelas culturas não se converte em produção vegetal (Paulilo *et al.*, 2015).

A partir da aplicação do teste estatístico Pettitt foi possível identificar 2 quebras em cada uma das séries diárias de diferenças de temperatura entre as áreas COM PODAS e SEM PODAS. Estes resultados são apresentados na Tabela 26. Nota-se que para a temperatura do ar o teste foi capaz de identificar com grande precisão o manejo de podas realizado nos dias 7 e 8 de outubro, definindo como pontos de quebra datas logo após o manejo nas áreas do *SAF_Denso* e *SAF_Interm*. Na área do *SAF_Simples* houve um atraso entre a data do manejo realizado e a data identificada pelo teste de Pettitt, o que pode ser associado à simplicidade do sistema, que proporcionava, antes do manejo, menor captação da radiação solar do que os sistemas mais complexos. Destaca-se que a complexidade dos SAFs não somente impacta na radiação solar incidente, mas também na velocidade dos ventos no interior da área. Ambos os fatores são importantes reguladores térmicos no interior de SAFs que influenciam o processo de evaporação de água do solo (Monteith *et al.*, 1991; Brenner, 1996).

Os valores médios de temperatura, para cada um dos períodos (antes da 1ª quebra, entre as quebras e após a 2ª quebra) de cada área são apresentados na Tabela 27.

Tabela 26: Quebras de tendência das séries diárias de temperatura do ar a 1 m

Área	Data da 1ª quebra	<i>p-value</i>	Data da 2ª quebra	<i>p-value</i>
<i>SAF_Denso</i>	08/10/2023	4,57E-06	18/01/2024	1,13E-06
<i>SAF_Interm</i>	07/10/2023	4,21E-02	06/04/2024	2,06E-05
<i>SAF_Simples</i>	22/10/2023	1,68E-10	24/03/2024	2,20E-16

Tabela 27: Temperaturas médias do ar a 1 m em função das quebras de tendência identificadas

Área	Antes da 1ª quebra			Entre as quebras			Após a 2ª quebra		
	COM PODA (°C)	SEM PODA (°C)	Dif. (°C)	COM PODA (°C)	SEM PODA (°C)	Dif. (°C)	COM PODA (°C)	SEM PODA (°C)	Dif. (°C)
<i>SAF_Denso</i>	20,8	20,9	-0,1	23,7	23,2	0,4	21,2	21,2	0,0
<i>SAF_Interm</i>	21,1	21,0	0,1	23,9	23,5	0,4	20,6	20,5	0,1
<i>SAF_Simples</i>	21,5	21,1	0,4	24,7	23,7	1,1	21,4	21,4	-0,1

Naturalmente, com a rebrota das árvores e o fechamento gradual do dossel durante a estação chuvosa, as diferenças de temperatura voltam a se aproximar de zero, assumindo comportamento similar ao anterior ao manejo, o que foi possível de ser identificado também com a aplicação do teste de Pettitt. Os resultados do teste também mostram que na área do *SAF_Simples* se observam as maiores diferenças de temperatura antes e após o manejo de podas realizado, conforme discutido anteriormente.

Assim como nos resultados de temperatura do solo, a data da 2ª quebra identificada pelo teste de Pettitt apresenta resultados próximos entre as áreas *SAF_Simples* e *SAF_Interm*, que tiveram seus dosséis totalmente abertos após o manejo de podas. Na área do *SAF_Denso* as variações observadas pelo teste de Pettitt foram menores e duraram menos tempo, o que pode estar associado baixa abertura do dossel.

Conforme discutido anteriormente, a regulação térmica em sistemas de café é um importante benefício ambiental promovida pelas árvores, inclusive para o contexto de mudanças climáticas (Gomes *et al.*, 2020). Eventos extremos de temperatura elevada podem interromper o processo fotossintético das plantas (DaMatta *et al.*, 2018). Nesse sentido, os valores máximos de temperatura do ar a nível diário são apresentados nas Figura 45 a 47. A nível mensal são apresentados na Figura 48 e sintetizados na Tabela 28, com os respectivos desvios padrão.

Figura 45: Temperaturas máximas diárias do ar a 1 m – *SAF_Simples*

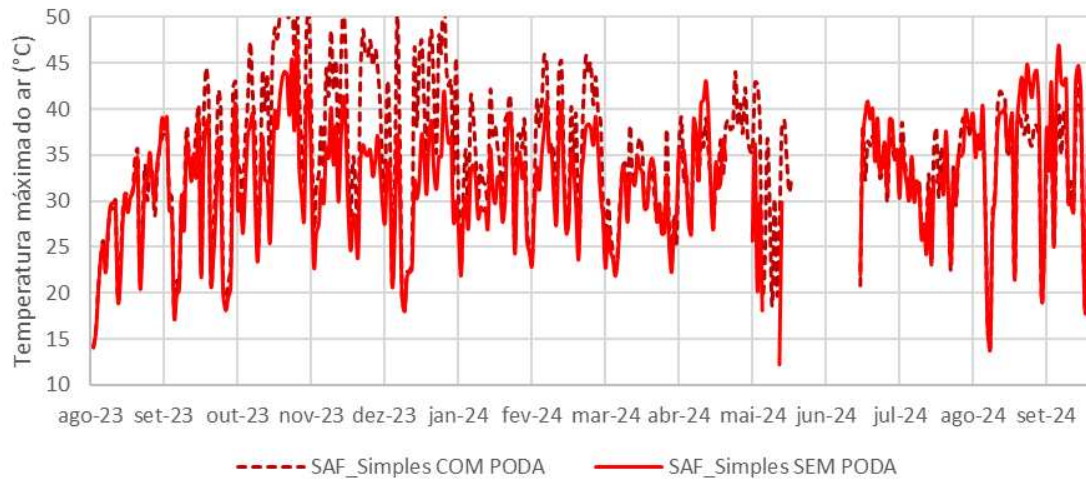


Figura 46: Temperaturas máximas diárias do ar a 1 m – *SAF_Interm*

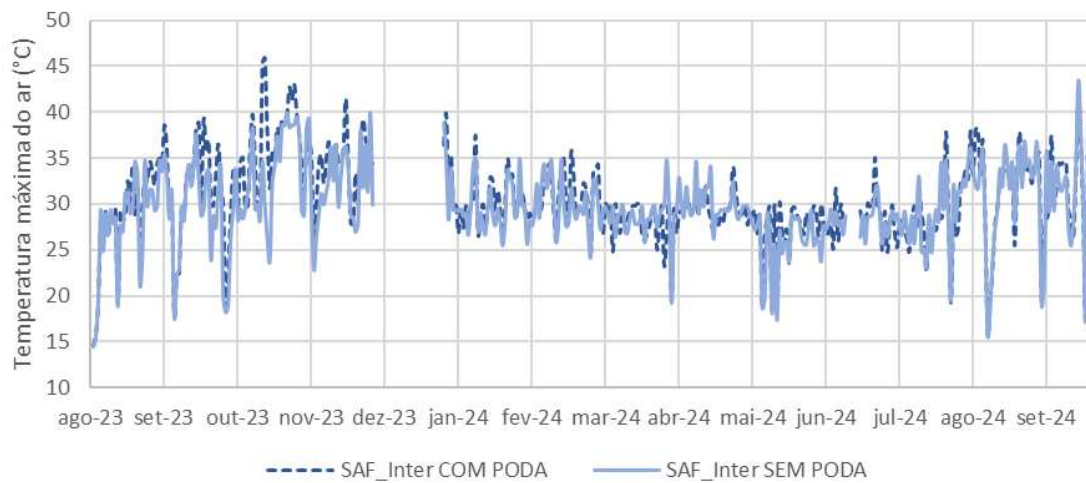


Figura 47: Temperaturas máximas diárias do ar a 1 m – *SAF_Denso*

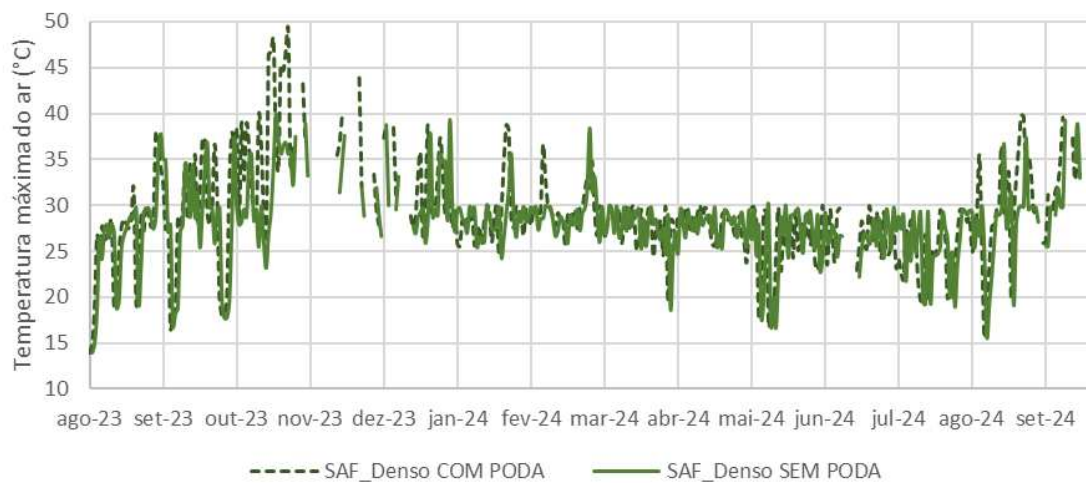


Figura 48: Temperaturas médias máximas mensais do ar a 1 m

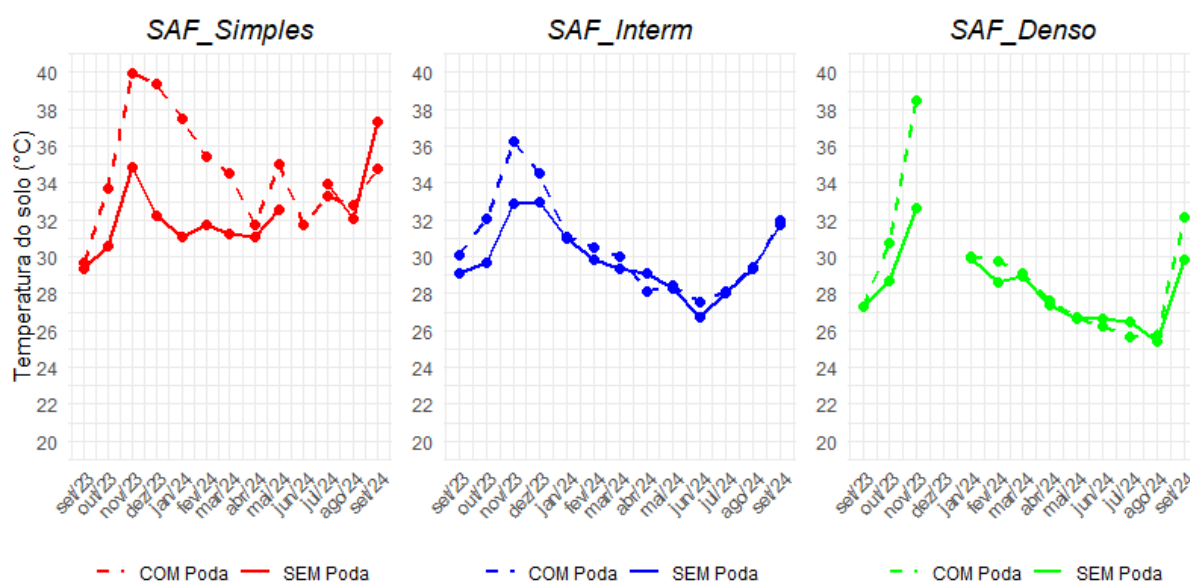


Tabela 28: Temperaturas médias máximas mensais do ar a 1 m

Data	SAF_Denso		SAF_Interm		SAF_Simples	
	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda
set/23	27,28 ± 5,09	27,32 ± 5,00	30,07 ± 4,63	29,08 ± 4,52	29,70 ± 5,43	29,37 ± 5,80
out/23	30,73 ± 6,42	28,65 ± 5,37	32,10 ± 4,89	29,71 ± 4,96	33,69 ± 8,35	30,59 ± 7,00
nov/23	38,45 ± 7,44	32,60 ± 4,91	36,26 ± 4,80	32,89 ± 5,13	39,96 ± 8,58	34,83 ± 6,83
dez/23	*	*	34,51 ± 3,38	32,98 ± 3,73	39,38 ± 8,48	32,24 ± 5,38
jan/24	30,01 ± 3,45	29,94 ± 3,45	31,09 ± 4,13	30,96 ± 3,52	37,51 ± 9,41	31,10 ± 5,73
fev/24	29,72 ± 3,41	28,64 ± 2,07	30,47 ± 2,23	29,88 ± 2,58	35,40 ± 5,78	31,77 ± 4,61
mar/24	29,08 ± 1,90	28,96 ± 2,45	30,03 ± 2,93	29,32 ± 2,35	34,57 ± 7,18	31,20 ± 5,44
abr/24	27,59 ± 2,25	27,35 ± 2,25	28,11 ± 2,37	29,09 ± 2,70	31,75 ± 4,16	31,04 ± 3,96
mai/24	26,70 ± 3,57	26,66 ± 3,49	28,48 ± 3,08	28,32 ± 3,59	35,03 ± 6,26	32,58 ± 6,99
jun/24	26,20 ± 2,88	26,65 ± 2,86	27,58 ± 2,53	26,74 ± 2,39	31,72 ± 6,63	*
jul/24	25,66 ± 2,55	26,47 ± 2,53	28,15 ± 2,25	28,03 ± 2,03	33,32 ± 3,97	33,93 ± 4,60
ago/24	25,70 ± 4,12	25,39 ± 3,94	29,42 ± 5,64	29,39 ± 5,11	32,82 ± 6,62	32,08 ± 6,58
set/24	32,12 ± 4,71	29,81 ± 3,97	32,01 ± 3,89	31,75 ± 4,30	34,78 ± 5,76	37,33 ± 7,49
MÉDIA	29,60 ± 3,74	28,51 ± 2,11	30,64 ± 2,47	29,86 ± 1,77	34,59 ± 2,87	31,47 ± 3,61

* Meses em que não foi possível quantificar as médias devido ao excesso de falhas

A partir da aplicação do teste estatístico Pettitt foi possível identificar 2 quebras nas séries diárias de diferenças de temperatura máxima do ar entre as áreas COM PODAS e SEM PODAS nas 3 áreas estudadas. Estes resultados são apresentados na Tabela 29. Nas áreas dos *SAF_Denso* e *SAF_Interm* o teste Pettitt foi capaz de apontar com precisão a data do manejo realizado, enquanto que para a área do *SAF_Simples* apresentou data aproximadamente 1 mês posterior ao evento. Tal fato provavelmente está associado à (ausência de) estratificação da área mais simplificada, que mesmo que com dossel coberto, apresenta temperaturas mais elevadas que as demais. Os valores médios de temperatura, para cada um dos períodos (antes da 1ª quebra, entre as quebras e após a 2ª quebra) de cada área são apresentados na Tabela 30.

Tabela 29: Quebras de tendência das séries diárias de variação de temperatura máxima do ar a 1 m

Área	Data da 1ª quebra	<i>p-value</i>	Data da 2ª quebra	<i>p-value</i>
<i>SAF_Denso</i>	07/10/2023	4,72E-03	13/01/2024	2,99E-03
<i>SAF_Interm</i>	08/10/2023	1,05E-02	20/03/2024	2,48E-04
<i>SAF_Simples</i>	03/11/2023	3,53E-12	25/03/2024	2,20E-16

Tabela 30: Médias de temperatura máxima do ar a 1 m em função das quebras de tendência identificadas

Área	Antes da 1ª quebra			Entre as quebras			Após a 2ª quebra		
	COM PODA (°C)	SEM PODA (°C)	<i>Dif.</i> (°C)	COM PODA (°C)	SEM PODA (°C)	<i>Dif.</i> (°C)	COM PODA (°C)	SEM PODA (°C)	<i>Dif.</i> (°C)
<i>SAF_Denso</i>	26,6	26,7	-0,1	34,3	30,6	3,7	28,0	27,7	0,2
<i>SAF_Interm</i>	29,3	28,6	0,7	32,8	31,0	1,8	29,0	29,0	0,0
<i>SAF_Simples</i>	30,8	29,2	1,7	38,3	32,5	5,8	33,3	33,1	0,2

Percebe-se o aumento das médias de temperatura máxima diária após o manejo de podas (período entre quebras). Este aumento foi mais significativo na área do *SAF_Simples*, com

diferença média de 5,8°C. Mais uma vez, o resultado reforça a ideia de como a complexidade dos SAFs sucessionais cria condições microclimáticas que, mesmo após as podas, mantém temperaturas menores que a de sistemas simplificados. Apesar disso, destaca-se que nas áreas do *SAF_Denso* e *SAF_Interm* a média das temperaturas máximas no período mais quente do ano se manteve superior a 30°C, tanto nas áreas com poda quanto nas áreas sem podas. O stress provocado por temperaturas muito altas durante o dia pode momentaneamente interromper a atividade fotossintética do cafeeiro, o que não é desejável (DaMatta e Ramalho, 2006). Sugere-se, então, que, especialmente no verão, quando a incidência de radiação solar é mais elevada, o manejo de podas drástica leve em conta algum sombreamento que possibilite a maximização do serviço ambiental promovido pelas árvores nos SAFs tanto do ponto de vista ambiental quanto do ponto de vista agrônomo, garantindo a manutenção de um microclima adequado à cultura do sub-bosque (Dulormne *et al.*, 2004).

No período correspondente à estiagem (após a 2ª quebra), a área do *SAF_Denso* apresentou as menores médias de temperatura máxima diária, novamente reforçando a importância da complexidade do sistema como ferramenta para manutenção de condições microclimáticas mais brandas. A manutenção de temperaturas menores no interior da área durante o período de estiagem é especialmente importante pois reduz a pressão das plantas por evapotranspiração num período em que a entrada de água no sistema por precipitação é reduzida (Allen *et al.*, 1998). A complexidade do sistema, aliada à alta densidade de plantio, mesmo nas áreas manejadas com podas drásticas, também contribui para redução das velocidades do vento, exercendo influência negativa na pressão por evapotranspiração das plantas (Brenner, 1996), o que é considerado desejável.

Ou seja, para além do manejo de podas especificamente, o manejo da AS centrado na sucessão ecológica se apresenta como ferramenta para manutenção de condições microclimáticas mais favoráveis ao desenvolvimento das culturas em comparação com SAFs simplificados.

3.5. *Imageamento multiespectral das áreas monitoradas*

Foram realizados 3 vôos com câmeras térmicas e multiespectrais na área de estudo antes do manejo de poda (setembro/2023 - início da estação chuvosa), no fim da estação chuvosa (abril/2024) e no início da estação chuvosa subsequente (setembro/2024). Os resultados de temperatura obtidos da câmera térmica e dos índices NDVI, SAVI, GCVI calculados a partir

das imagens multiespectrais são apresentados nas Figuras 49 a 52 e reunidos na Tabela 31, com resultado do teste de Tukey a 5%. Letras diferentes na mesma linha indicam diferenças significativas ($p < 0,05$).

Figura 49: Temperatura monitorada nas áreas de estudo

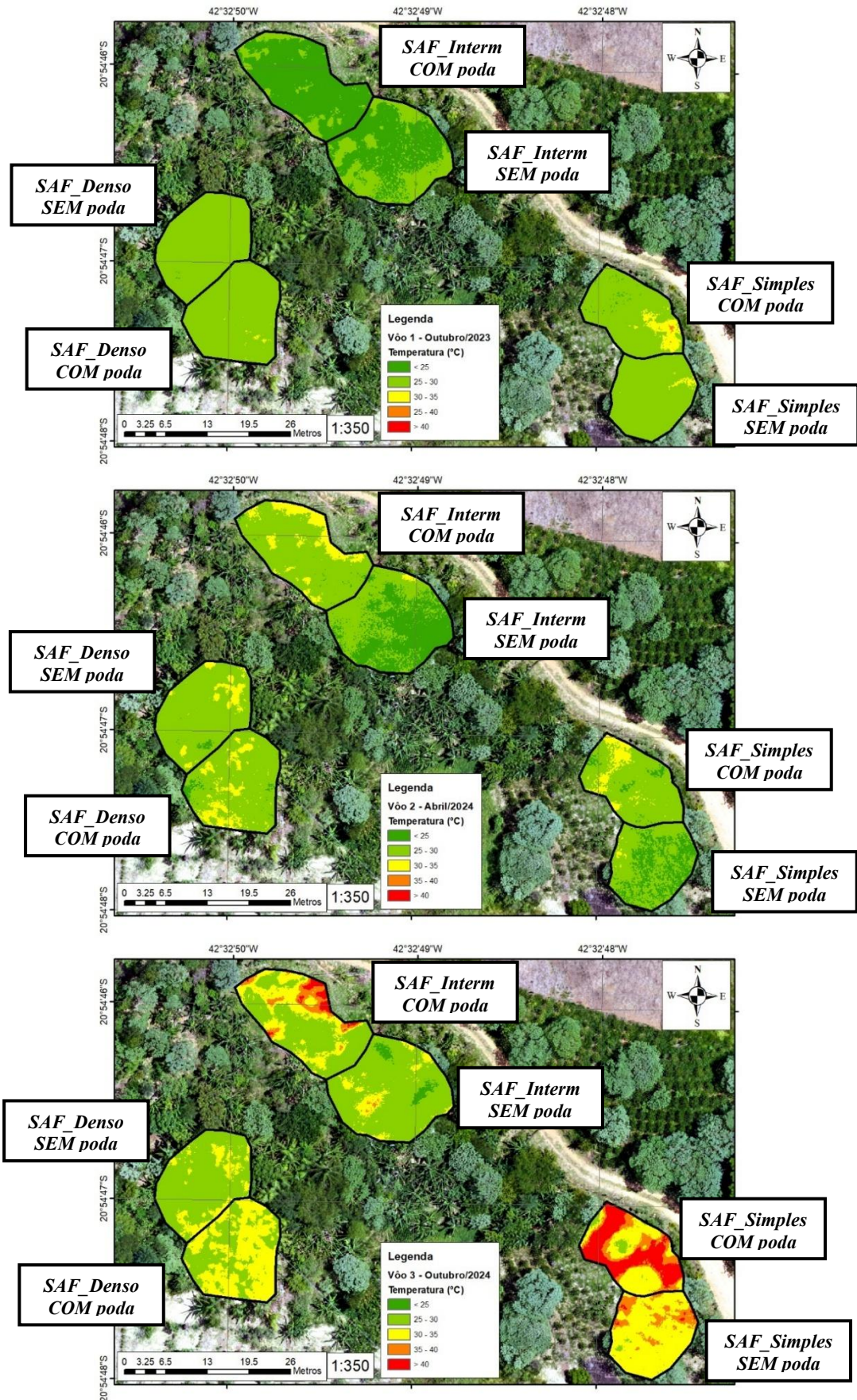


Figura 50: Índice NDVI monitorado nas áreas de estudo

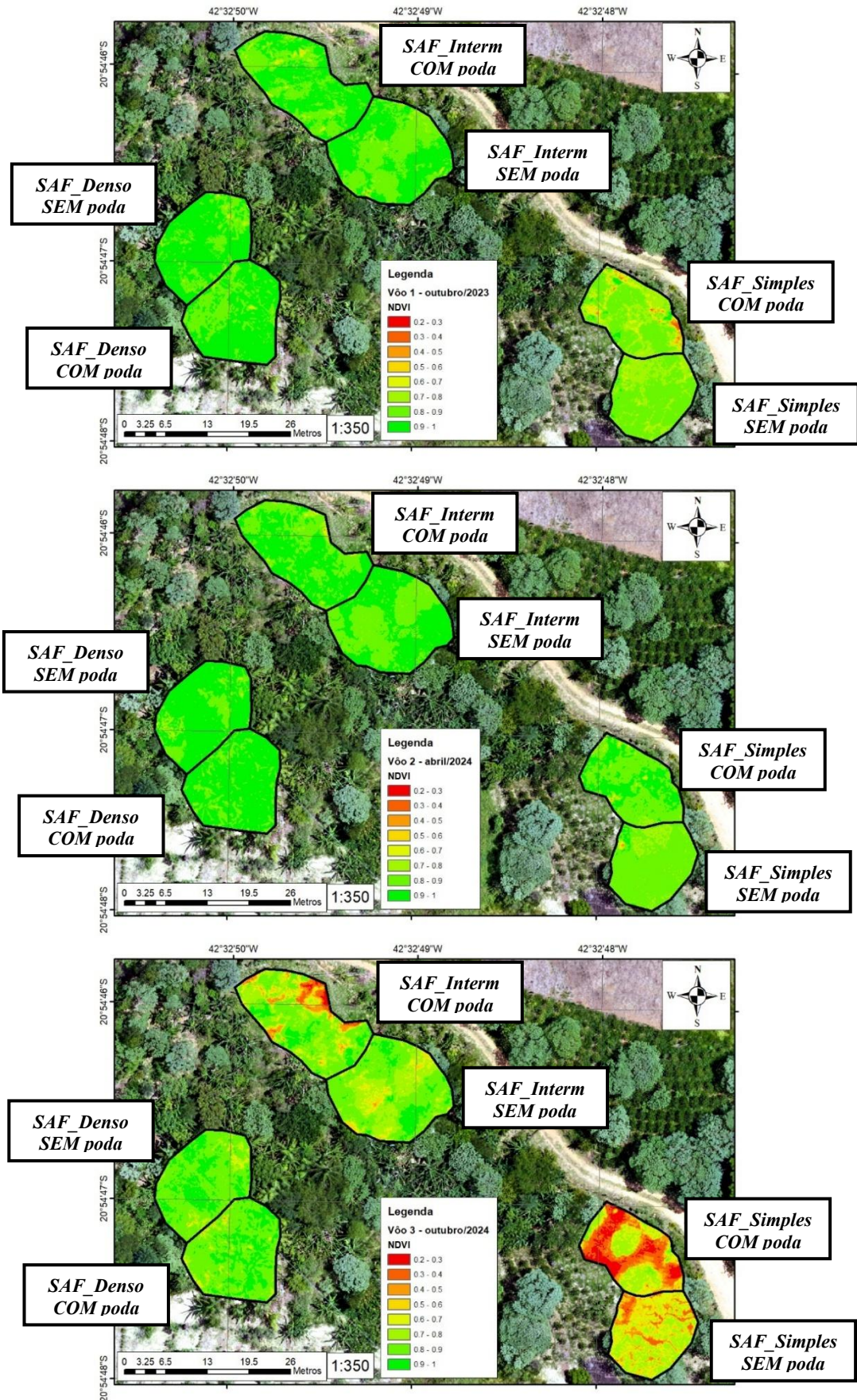


Figura 51: Índice SAVI monitorado nas áreas de estudo

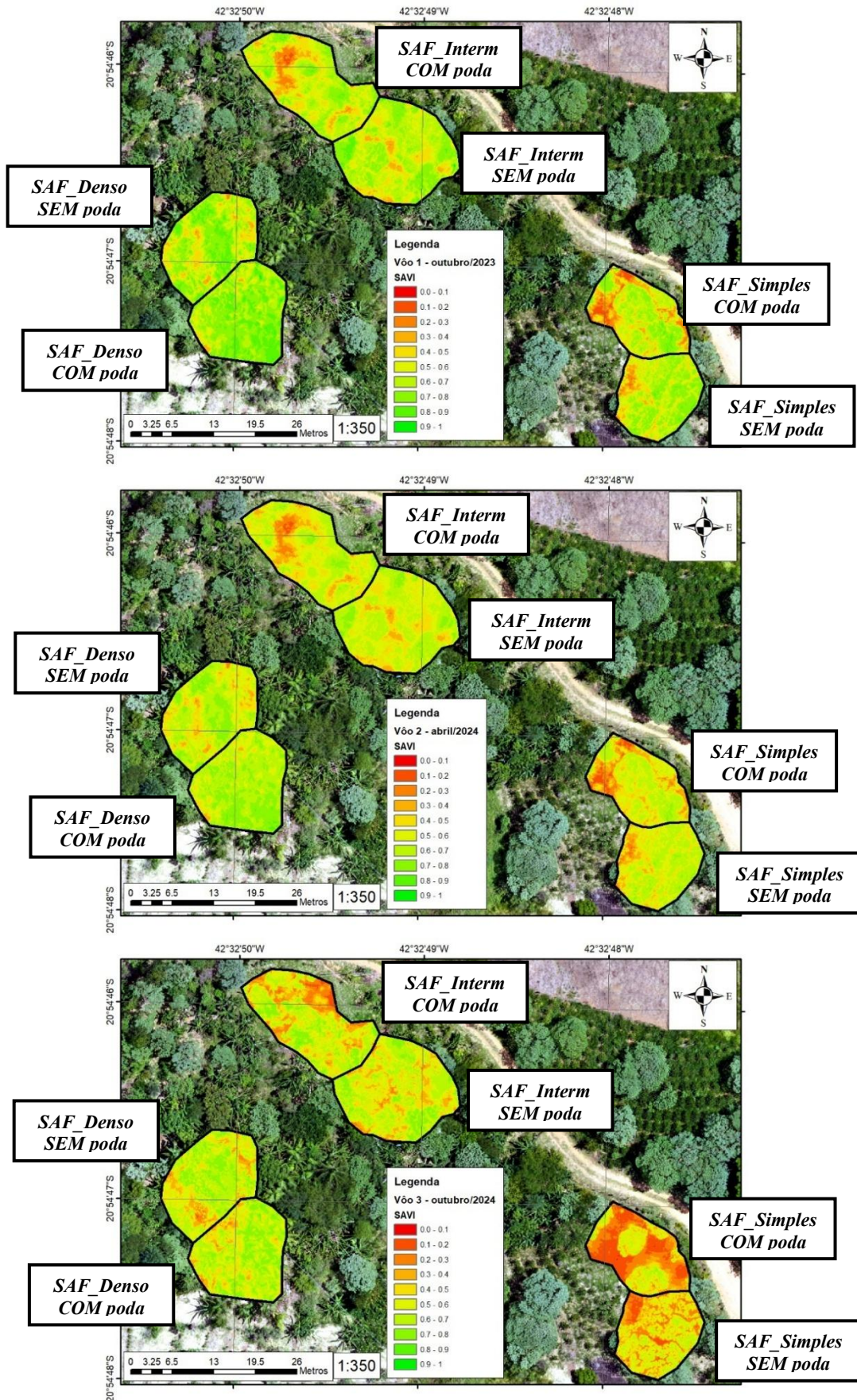


Figura 52: Índice GCVI monitorado nas áreas de estudo

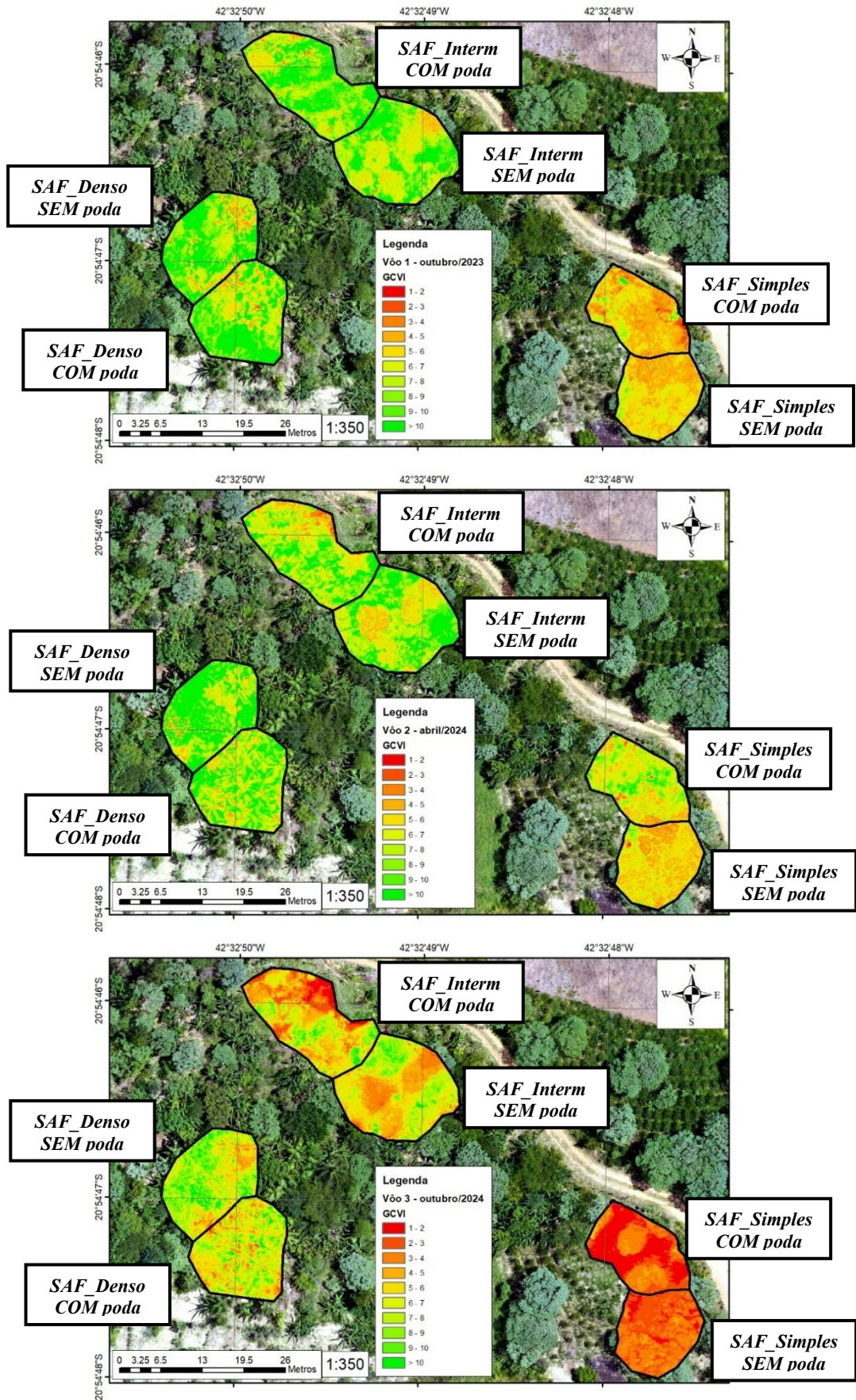


Tabela 31: Resultados de temperatura, índices NDVI, SAVI e GCVI nas áreas estudadas

Vôo	Índice	<i>SAF_Denso</i>		<i>SAF_Interm</i>		<i>SAF_Simples</i>	
		COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda	COM poda	SEM poda
Vôo 1 – outubro/ 2023	T (°C)	28,0 ± 0,4 a	26,7 ± 0,8 ab	24,2 ± 0,5 c	25,2 ± 0,5 bc	27,8 ± 1,6 a	27,8 ± 1,1 a
	NDVI	0,93 ± 0,02 a	0,90 ± 0,20 abc	0,87 ± 0,07 abc	0,90 ± 0,34 ab	0,80 ± 0,11 c	0,80 ± 0,04 bc
	SAVI	0,75 ± 0,11 a	0,63 ± 0,14 ab	0,50 ± 0,14 b	0,65 ± 0,09 ab	0,52 ± 0,16 b	0,60 ± 0,09 ab
	GCVI	10,60 ± 3,55 a	8,57 ± 2,43 ab	8,97 ± 2,48 ab	8,15 ± 1,34 ab	5,86 ± 1,88 b	5,18 ± 0,71 b
Vôo 2 – abril/ 2024	T (°C)	29,8 ± 0,9 a	29,7 ± 0,8 a	29,6 ± 0,7 ab	28,2 ± 0,5 b	29,7 ± 1,2 a	28,5 ± 0,8 ab
	NDVI	0,93 ± 0,02 a	0,93 ± 0,02 a	0,89 ± 0,02 a	0,92 ± 0,02 a	0,90 ± 0,03 a	0,82 ± 0,05 b
	SAVI	0,68 ± 0,09 a	0,58 ± 0,12 ab	0,47 ± 0,12 b	0,60 ± 0,07 ab	0,48 ± 0,13 b	0,55 ± 0,07 ab
	GCVI	10,50 ± 2,85 ab	11,20 ± 2,36 a	6,87 ± 2,50 bc	9,71 ± 1,44 ab	7,52 ± 1,59 bc	5,07 ± 1,21 c
Vôo 3 – outubro/ 2024	T (°C)	30,8 ± 0,9 bc	28,7 ± 0,8 c	30,4 ± 1,6 bc	27,8 ± 1,8 c	36,4 ± 4,6 a	33,8 ± 2,1 ab
	NDVI	0,90 ± 0,03 a	0,85 ± 0,09 ab	0,77 ± 0,13 ab	0,86 ± 0,07 ab	0,56 ± 0,23 c	0,66 ± 0,05 bc
	SAVI	0,63 ± 0,06 a	0,53 ± 0,11 ab	0,55 ± 0,11 ab	0,62 ± 0,08 a	0,39 ± 0,22 ab	0,51 ± 0,07 b
	GCVI	7,59 ± 1,94 a	7,51 ± 2,59 a	5,22 ± 1,45 ab	6,68 ± 1,54 a	2,86 ± 1,25 b	2,98 ± 0,44 b

T: temperatura da superfície; NDVI: Normalized Difference Vegetation Index; SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index; GCVI: Green Chlorophyl Vegetation Index

Os resultados mostram que a área do *SAF_Simples*, de forma recorrente, apresentou os menores índices de vegetação quando comparado com as áreas *SAF_Interm* e *SAF_Denso*. Ou seja, mostram como a complexidade das agroflorestas, principalmente sua estratificação, são capazes de garantir melhores condições para as culturas, o que pode estar relacionado com a retenção de umidade e condições microclimáticas (Junior *et al.*, 2016). A estratificação cria camadas que, se por um lado retém parte da precipitação (como visto no item 3.2), retém também parte radiação incidente ao solo, reduz velocidade dos ventos e, conseqüentemente, reduz taxas de evaporação do solo e transpiração pelas plantas sombreadas (Monteith *et al.*, 1991; Brenner, 1996). Sistemas mais simplificados, embora apresentem vantagens ambientais frente a cultivos monoculturais convencionais (Lin, 2007; Gliessman, 2008; Gomes *et al.*, 2020), podem trazer ainda mais benefícios para o sítio produtivo conforme vão evoluindo no estágio sucessional dentro da proposta de manejo da AS.

Após o período chuvoso – entre os vôos 1 e 2 – os índices de vegetação são praticamente constantes em todas as áreas, não havendo distinção clara quanto à realização ou não do manejo de podas. Isto pode estar associado ao volume de precipitação no período, que foi superior à

média histórica e suficiente para garantir a manutenção da sanidade/qualidade das culturas independente do manejo de podas realizado. A precipitação média na região da Serra do Brigadeiro é suficiente para manutenção de sistemas com café e árvores, assim como de monoculturas de café (Carvalho, 2011).

Já após o período de estiagem – entre os vãos 2 e 3 – os índices de vegetação das áreas *SAF_Denso* e *SAF_Interm* são notoriamente superiores aos da área *SAF_Simples*. A área do *SAF_Simples* que recebeu o manejo de podas apresentou os piores resultados, com NDVI inferior a 0,6 - valor considerado limite para sanidade das plantas (Allen *et al.*, 2002). Este resultado indica que a manutenção de um certo grau de sombreamento pode ser benéfica durante o manejo de podas, visando manter melhor sanidade das culturas ao longo de todo o ano seguinte, especialmente em SAFs simplificados. Ou seja, a poda drástica, tal como realizada, poderia ser conduzida de forma mais criteriosa, evitando-se a abertura do dossel completamente, mesmo considerando que a capoeira-branca apresenta rápido rebrote. Ainda, os resultados sugerem novamente que a complexidade dos sistemas os tornam mais resilientes às estiagens, à medida que a estratificação contribui para manutenção de um melhor microclima nas áreas de cultivo, reduzindo a demanda evaporativa e minimizando o stress hídrico da cultura sombreada (Dulorme *et al.*, 2004). Destaca-se, todavia, a severa estiagem ocorrida durante os meses de maio a setembro de 2024, no qual houve uma precipitação acumulada de 40 mm, que certamente influenciou para redução dos índices de vegetação na região, em especial no *SAF_Simples*.

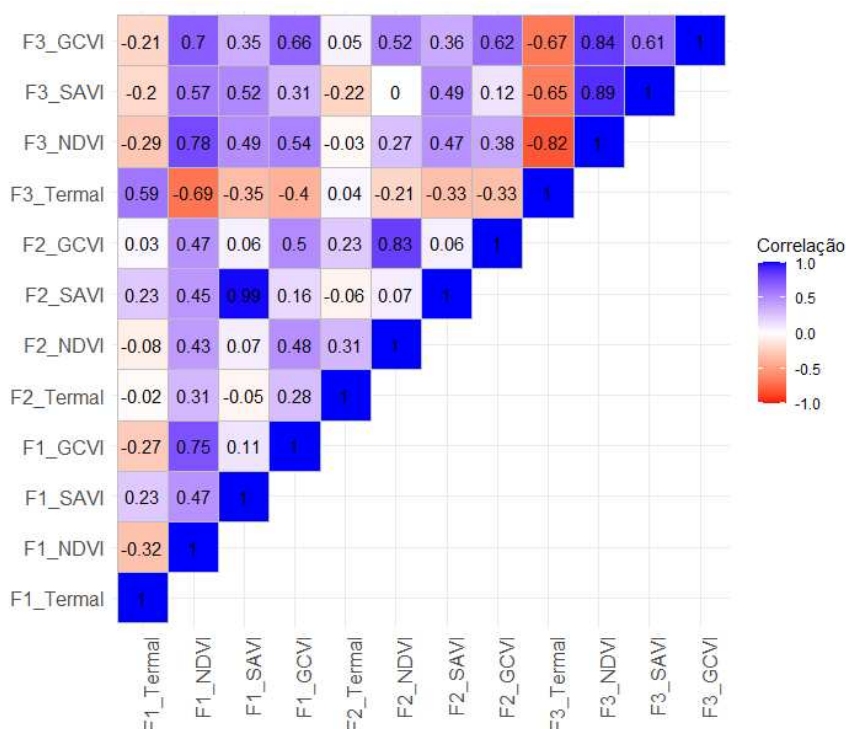
As temperaturas medidas no vão 3 na área do *SAF_Simples* são superiores a 33°C, próximas do limite fisiológico de 34°C apresentado pela cultura do cafeeiro, no qual a planta interrompe seu processo de fotossíntese (DaMatta *et al.*, 2018). Como os vãos foram realizados no período da manhã, entre 09:00 e 10:00, infere-se que nas horas mais quentes do dia as temperaturas nas áreas foram maiores, corroborando os resultados apresentados no item 3.4.

Nas áreas mais complexas *SAF_Interm* e *SAF_Denso* os índices se mantiveram satisfatórios após a estiagem nos 2 tratamentos (com poda e sem poda). Hasselquist *et al.* (2017) avaliaram a influência da copa de árvores em SAFs com café e verificaram maior evaporação direta do solo sob árvores caducifólias, indo ao encontro da ideia de que a exposição à radiação promovida pelo manejo de poda resulta em maiores temperaturas do ar e do solo, intensificando a perda de água por evaporação.

Os resultados encontrados reforçam a ideia da AS como um modelo de produção no qual os princípios devem atuar de forma conjunta (Rebello e Sakamoto, 2022). Não se deve encarar a poda isoladamente como forma de manejo, mas sim inserida num contexto de plantio em diversidade, em abundância e mirando-se na estratificação das áreas tal como os sistemas ecológicos naturais. Quando estes princípios estão presentes de forma sincronizada, o manejo de podas pode – e deve – ser realizado sem prejuízo à qualidade dos cultivos. Cabe ao(à) agricultor(a) identificar os momentos em que se deve manejar o sistema através das podas.

A matriz de correlação entre os resultados obtidos é apresentada na Figura 53. Não houve correlação significativa entre os índices monitorados e as temperaturas obtidas pela câmera termal durante os vôos 1 e 2. No vôo 3, houve correlação negativa satisfatória ($R = -0,82$) entre a temperatura e o índice NDVI, o que reforça a tese de que o conforto térmico promovido pelo sombreamento contribui para manutenção de melhor sanidade das culturas, em especial após um longo período de estiagem. Isso se torna especialmente importante para a cafeicultura da Zona da Mata Mineira num contexto de mudanças climáticas (Gomes *et al.*, 2020; Lin, 2007). Entre os índices de vegetação, as maiores correlações visualizadas foram entre os índices NDVI e GCVI (vôos 1, 2 e 3), e entre NDVI e SAVI (apenas no vôo 3).

A tendência dos maiores índices de vegetação no sentido da maior complexidade dos sistemas estudados vai ao encontro da tendência observada nos resultados de umidade do solo na camada superficial. Estes resultados corroboram a tese proposta pela AS de que “água se planta”, se referindo a manutenção de umidade no solo e disponibilidade hídrica para as culturas na implantação de SAFs sucessionais (Rebello e Sakamoto, 2022).

Figura 53: Matriz de correlação entre os índices obtidos

De forma geral, o índice SAVI se mostrou menos eficaz na distinção entre as áreas após aplicação do teste de Tukey, quando comparado com os índices NDVI e GCVI.

Por fim, destaca-se o potencial do uso de VANTs em estudos em SAFs, o que ainda é pouco encontrado na literatura (Sharma *et al.*, 2022). Na revisão elaborada pelos autores foram identificados 33 trabalhos que utilizaram VANTs em estudos em SAFs, com os objetivos de: estimar altura de árvores, mapeamento da extensão de SAFs, identificação e diversidade de espécies, previsão de colheita, cobertura do dossel, detecção de mudanças de uso/cobertura do solo, classificação de árvores, modelagem de padrões e produtividade, biomassa e distribuição de raízes, estimativa de biomassa sobre o solo, interação árvore-lavoura, grau de desfolha das árvores.

A utilização de VANTs apresenta as vantagens de alta resolução espacial e temporal, baixo custo operacional e flexibilidade de operação (Pádua *et al.*, 2017). E pode ser associada a ferramentas de aprendizado de máquina para atender a múltiplos propósitos (Kou *et al.*, 2024).

As caracterizações e modelagens possíveis de serem realizadas com a utilização dos VANTS podem contribuir na quantificação dos serviços ecossistêmicos promovidos pelos SAFs

(Lourenço *et al.*, 2021) e também apoiar a tomada de decisão quanto ao manejo de podas e a densidade de plantio realizadas em SAFs sucessionais, como os do presente trabalho.

4. Conclusões

As análises realizadas a partir do monitoramento hídrico e térmico de SAFs de estágios sucessionais distintos sujeitos ao manejo de podas permitiram evidenciar a influência deste nas variáveis ligadas ao balanço hídrico do solo. O manejo de podas drásticas foi realizado em duas das áreas mais novas. Na mais antiga, e mais avançada no estágio sucessional, por conta de a cultura principal já ter evoluído do café para a juçara, o manejo de podas drásticas foi mais seletivo, mantendo-se ainda uma cobertura do dossel de 75%. O manejo realizado anterior ao período chuvoso contribuiu para redução da interceptação proporcionada pelas árvores, reduzindo coeficientes de interceptação de 20-28% para 4-11% no ano hidrológico monitorado. Com isso, foram visualizados maiores valores de umidade na camada superficial (10 cm) e, principalmente, subsuperficial (80 cm) nas parcelas manejadas. Nestas, aproximadamente 70% dos eventos de precipitação resultaram em elevação da umidade na primeira camada, contra 57-66% nas áreas sem o manejo.

Foi constatada a maior permanência de valores elevados de umidade nas áreas manejadas, o que foi associado também à maior entrada de precipitação. Sugeriu-se, então, que a maior evapotranspiração promovida pela abertura do dossel e maior incidência de radiação solar tenha sido inferior ao maior aporte de água pela precipitação. Durante o período de estiagem, o consumo de água pelas árvores entra em equilíbrio com as menores umidades do solo, mantendo-se níveis de umidade semelhantes entre as áreas manejadas e não manejadas.

A abertura do dossel, em combinação com a manutenção de maiores teores de umidade no perfil do solo, promoveu maiores velocidades de percolação da frente de molhamento nas áreas manejadas com poda, criando mais possibilidade de recarga hídrica. Por outro lado, ocorreu elevação da temperatura do ar e do solo imediatamente após o manejo, reduzindo em parte o benefício microclimática promovido pelas árvores sobre as plantas de café. Este efeito foi mais significativo na área simplificada, o que foi associado a (ausência de) estratificação, e foi significativo por um período de 4 a 5 meses.

As áreas mais avançadas apresentaram índices de vegetação sistematicamente maiores que a área simplificada, o que reforçou a ideia de que os princípios da AS devem atuar de forma

conjunta, tendo como foco principal o avanço sucessional das áreas manejadas, para a manutenção de boa sanidade dos cultivos. Em especial, destacou-se a redução dos índices de vegetação e aumento da temperatura da área do *SAF_Simples*, após o longo período de estiagem monitorado. Tal resultado reforça a proposta da AS como mitigadora dos efeitos das mudanças climáticas e estratégia para construção de agroecossistemas resilientes.

Por fim, a inclusão do manejo de podas nos estudos de processos hidrológicos em SAFs traz uma nova perspectiva para estes, jogando luz para o fato de que nestes sistemas a componente do manejo não pode ser ignorada. SAFs são dinâmicos no espaço e no tempo e o papel do(a) agricultor(a) pode direcionar o sistema para maior ou menor permanência de água no ambiente.

5. Limitações do estudo e sugestões para estudos futuros

O presente trabalho se tratou de um estudo observacional exploratório, identificando tendências sobre o comportamento hídrico e térmico de SAFs sucessionais sujeito ao manejo de podas. O estudo foi realizado em áreas contíguas, de mesma altitude e face de exposição, visando evidenciar o efeito do estágio sucessional dos SAFs nas suas dinâmicas térmica e hídrica. Entretanto, ainda assim foram identificados resultados demasiadamente altos de umidade no solo em uma das áreas, o que foi associado a um efeito de sítio. Em estudos futuros, arranjos experimentais mais robustos devem ser pensados para confirmar os resultados obtidos no presente estudo. Neste contexto, além da escolha por uma área de estudo mais regular, sugere-se para estudos futuros a escolha de áreas onde haja possibilidade de monitoramento mais frequente, visando reduzir a possibilidade de falhas nos dados e maior controle sobre os manejos realizados.

O período de monitoramento, restrito a 12 meses, foi suficiente para cobrir variações de umidade dentro de um único ano hidrológico. O monitoramento por períodos maiores, pelo menos 24 meses, possibilita maiores conclusões sobre os fenômenos observados, diluindo possíveis especificidades do período monitorado, como por exemplo a longa estiagem durante os meses de maio a setembro.

Outra limitação vislumbrada no presente trabalho é a definição dos valores de capacidade de campo, que se mostraram subestimados quando confrontados com os resultados de umidade obtidos pelos sensores. A calibração dos sensores foi realizada com uma amostra para a camada de 10 cm e outra para a camada de 80 cm, em local imediatamente adjacente aos talhões

estudados. Sugere-se, para estudos futuros, a calibração individual de cada sensor, com tomada de amostra na face oposta da trincheira à qual foi instalado os sensores de umidade, visando reduzir eventuais diferenças entre o solo no local onde foi tomada a amostra para calibração e o local onde o sensor for instalado, produzindo maior consistência aos resultados de umidade obtidos.

Os sensores de temperatura do ar utilizados no presente trabalho foram instalados em abrigos de baixo custo. Embora na literatura se encontrem estudos ressaltando a eficácia deste monitoramento, nas horas mais quentes do dia, devido ao excesso de exposição solar dos equipamentos, as temperaturas do ar registradas foram superestimadas, chegando a valores superiores a 40°C em alguns dias. Além disso, outros fatores contribuintes para a evapotranspiração dos sistemas – como velocidade do vento e incidência de radiação solar – não foram medidos no presente estudo. Para estudos futuros recomenda-se a instalação de estações meteorológicas completas e automatizadas, com transmissão dos dados em tempo real, de modo a contemplar as demais variáveis citadas e trazer maior consistência para os resultados obtidos de temperatura, além de possibilitar o acompanhamento mais frequente da tensão da bateria e do sistema como um todo.

O monitoramento das áreas através do uso de VANTs e seus resultados de temperatura e índices de vegetação se mostrou uma aplicação interessante, apresentando retratos gerais do período antes do manejo e após o período de chuvas e de estiagem. Para estudos futuros, sugere-se a repetição de mais vôos na área de estudo, de forma a se criar séries históricas com menor intervalo de tempo, permitindo maior acompanhamento e melhor aprofundamento dos resultados. Nesse sentido, reforça-se a ideia da escolha por uma área de estudo onde possa haver maior frequência de visitação e intervenção.

Do ponto de vista do balanço hídrico, destaca-se a necessidade de se aprofundar o conhecimento na relação entre a diversidade e complexidade dos sistemas e o consumo de água. Para além da demanda individual das espécies, a presença de micorrizas estimulada pela diversidade, pode aumentar a capacidade de absorção de água pelas plantas, influenciando no balanço hídrico. A possível competição por água e nutrientes entre as espécies deve ser avaliada, de modo a validar o manejo proposto e torna-lo atraente aos agricultores também do ponto de vista produtivo.

Referências Bibliográficas

AHMAD, F.; GOPARAJU, L.; QAYUM, A. FAO guidelines and geospatial application for agroforestry suitability mapping: case study of Ranchi, Jharkhand state of India. **Agroforest Syst**, v. 93, pp. 31–544, 2019.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998.

ALLEN, R. G.; WATERS, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; BASTIAANSEN, W. SEBAL, **Surface Energy Balance Algorithms for Land**, Idaho Implementation, Version 1.0. Advanced Training and User's Manual. 2002. Disponível em: <https://posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2017/04/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf>.

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 111-116, 2011.

ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V.; ROCHA, P. A. B. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de mata atlântica em uma microbacia experimental em Cunha – São Paulo. **R. Árvore**, v. 27, n. 2, p. 257-262, 2003.

AVELINO, J.; GAGLIARDI, S.; PERFECTO, I.; ISAAC, M. E.; LIEBIG, T.; VANDERMEER, J.; MERLE, I.; HAJIAN-FOROOSHANI, Z.; MOTISI, N. Tree effects on coffee leaf rust at field and landscape scales. **Plant Disease**, v. 107, pp. 247-261, 2023.

AZIZAH, F. R.; PRAYOGO, C.; KURNIAWAN, S.; ROWE, R. L. Microbial Biomass and Soil Respiration Response to Pruning and Fertilization Practices in Coffee-Pine Agroforestry. **Journal of Ecological Engineering**, 24(8), 329–342, 2023.

BAGYARAJ, J.D.; STÜRMER, S.L. Fungos micorrízicos arbusculares (FMAs). In: Moreira, F. M. S., organizador. **Manual de Biologia dos Solos Tropicais**. Lavras: UFLA; 2010.

BAI, Z. G.; DENT, D.; OLSSON, L.; SCHAEPMAN, M. E. **Global assessment of land degradation and improvement 1: identification by remote sensing**. Wageningen: International Soil Reference Centre (ISRIC). 2008.

BALDI, C. G. O.; MOQUEDACE, C. M.; IMBANÁ, R.; SILVA, W. J.; MAIA, E. Importância dos sistemas agroflorestais para a fixação perene de carbono orgânico no solo. **Cadernos de**

Agroecologia – ISSN 2236-7934 – Anais do XII Congresso Brasileiro de Agroecologia, v. 19, n. 1, 2024.

BALEEIRO, A. V. F.; DE MARCO JR., P. Bases científicas e epistemológicas para a Agricultura Sintrópica. **Cadernos de Agroecologia** – ISSN 2236-7934 – Anais do VI CLAA, X CBA e V SEMDF – Vol. 13, Nº 1, Jul. 2018.

BIRDLIFE INTERNATIONAL. **Important Bird Area factsheet: Parque Estadual da Serra do Brigadeiro (Brazil)**. Disponível em: <https://datazone.birdlife.org/site/factsheet/parque-estadual-da-serra-do-brigadeiro-iba-brazil>. Acesso em: 23/12/2024.

BORBA, M. Z.; FREDDI, O. S.; TREVISAN, R. G.; EITELWEIN, M. T.; MOLIN, J. P. Condutividade elétrica aparente no mapeamento da textura do solo. **XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 2015.

BRITO, A. S.; LIBARDI, P. L.; MOTA, J. C. A.; MORAES, S. O. Estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção e pela densidade de fluxo da água. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 35, pp. 1939-1948, 2011.

BUYINZA, J.; MUTHURI, C. W.; DENTON, M. D.; NUBERG, I. K. Impact of tree pruning on water use in tree-coffee systems on smallholder farms in Eastern Uganda. **Agroforestry Systems**, v. 97, pp. 953-964, 2023.

BRENNER, A. J. Microclimatic modifications in Agroforestry. In: **Tree-Crop Interactions: A Physiological Approach**. Ed: Ong, C. K.; Huxley, P. CAB International, Cambridge, 1996.

CALUX, J.; THOMAZ, E. L. Interceptação e precipitação interna: comparação entre floresta ombrófila mista e *Pinus elliotti var. elliotti*. **Geoambiente on-line**, n. 19, pp. 24-39, jul-dez/2012.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **CS616 and CS 625 Water Content Reflectometers**. Product Manual. Revision: 05/2020.

CARVALHO, A. F. **Água e radiação em sistemas agroflorestais com café no território da Serra do Brigadeiro – MG**. Tese D. Sc. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa. 2011.

CARVALHO, R.; GOEDERT, W. J.; ARMANDO, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1153-1155, 2004.

CHEN, Q. *et al.* Soil moisture determines the consistency of organic matter decomposition in field and lab test patterns. **Catena**, 246, 108465, 2024.

CHEN, S. Y.; ZHANG, X. Y.; PEI, D.; SUN, H. Y.; CHEN, S. L. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: field experiments on the North China Plain. **Ann. Appl. Biol.**, v. 150, pp. 261–268, 2007.

CHIANUCCI, F.; MACEK, M. hemispher: an R package for fisheye canopy image analysis. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 336, 109470, 2023.

CORTEZ, J. Field decomposition of leaf litter: relationships between decomposition rates, soil moisture, soil temperature and earthworm activity. **Soil Biol. Biochem.**, Vol. 30, No. 6, pp. 783-793, 1998.

DAMATTA, F. M.; AVILA, R. T.; CARDOSO, A. A.; MARTINS, S. C. V.; RAMALHO, J. C. Physiological and Agronomic Performance of the Coffee Crop in the Context of Climate Change and Global Warming: A Review. **J. Agric. Food Chem.**, v. 66, pp. 5264–5274, 2018.

DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Braz. J. Plant Physiol.**, v. 18, n. 1, pp. 55-81, 2006.

DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. F.; MARIA, I. C. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 2, p.224-233, 2015.

DULORMNE, M.; SIERRA, J.; BONHOMME, R.; CABIDOCHÉ, Y. M. Seasonal changes in tree–grass complementarity and competition for water in a subhumid tropical silvopastoral system. **Europ. J. Agronomy**, v. 21, pp. 311–322, 2004.

EPAGRI. **Sistemas agroflorestais de produção: Conceitos, princípios e aplicações em Santa Catarina**. Boletim Técnico nº 217. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. Florianópolis, maio de 2024.

ESCHE, L.; SCHNEIDER, M.; MILZ, J.; ARMENGOT, L. The role of shade tree pruning in cocoa agroforestry systems: agronomic and economic benefits. **Agroforest Syst**, v. 97, pp. 175–185, 2023.

FERREIRA, V. J.; MELO, D. S.; SILVA, S. P. D.; ALVES, G. S.; RIBEIRO, M. C. B. O.; SANTOS, O. M. S. P.; TEDGUE, L. B.; SARMENTO, M. I. A.; SANTOS, S. S.;

CERQUEIRA, C. R. Sistema agroflorestal e o processo de diversificação produtiva na agricultura familiar. **Revista Aracê**, v. 7, n. 1, pp. 2145-2160, 2025.

FOGAÇA, B. M.; LESSA, A. J. S.; NASCIMENTO, M. S.; NETTO, M. O. M. Agricultura sintrópica. **Revista Reiva**, v. 6, n. 1, 2023.

FRANCO, F. S.; COUTO, L.; CARVALHO, A. F.; JUCKSCH, I.; FERNANDES FILHO, E. I.; SILVA, E.; MEIRA NETO, J. A. A. Quantificação de erosão em sistemas agroflorestais e convencionais na Zona da Mata de Minas Gerais. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.26, n.6, p.751-760, 2002.

FREITAS, M. **Caracterização de sensores e abrigos meteorológicos de baixo custo**. Trabalho de conclusão de curso, Instituto de Física e Escola de Engenharia da UFRGS, Porto Alegre, 2018.

GALVANI, E.; DE LIMA, N. G. B. Fotografias hemisféricas em estudos microclimáticos: Referencial teórico-conceitual e aplicações. **Ciência e Natura**, v. 36 Ed. Especial, p. 215–221, 2014.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia**: processos ecológicos em agricultura sustentável. Editora UFRGS, Porto Alegre, 2008.

GOMES, L. C.; BIANCHI, F. J. J. A.; CARDOSO, I. M.; FERNANDES, R. B. A.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHULTE, R. P. O. Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: A spatially explicit assessment in Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 294, 1068, 2020.

GOMES, L. C.; CARDOSO, I. M.; MENDONÇA, E. S.; FERNANDES, R. B. A.; SCHIAVON, V. L.; OLIVEIRA, T. S. Trees modify the dynamics of soil CO₂ efflux in coffee agroforestry systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 224, pp. 30-39, 2016.

GOSME, M.; DUFOUR, L.; AGUIRRE, H. D. I.; DUPRAZ, C. Microclimatic effect of agroforestry on diurnal temperature cycle. **3rd European Agroforestry Conference - EURAF**, 2016.

GREGIO, J. V. Da degradação à floresta: A Agricultura Sintrópica de Ernst Götsch e sua aplicação nas fazendas Olhos D'Água e Santa Teresinha, Piraí do Norte/BA. **AMBIENTES**, Volume 2, Número 2, pp. 106-143, 2020.

- GUIMARÃES, L. A. O.; MENDONÇA, G. C. Agricultura sintrópica (agrofloresta sucessional): fundamentos e técnicas para uma agricultura efetivamente sustentável. **Incaper em Revista**, Vitória, v. 10, p. 6-21, jan./dez., 2019.
- HARTOYO, A. P. P.; KARIMATUNNISA, T. A.; IKHFAN, A. N., WIJAYANTO, N.; AZIZAH, S. Vegetation structure, composition and diversity in agroforestry system in Andongrejo Village, Jember Regency, East Java. IOP Conf. Series: **Earth and Environmental Science**, 449, 012017, 2020.
- HORTON, R. E. Rainfall interception. **Monthly Weather Review**, Vol. 47, No. 9, 1919.
- HORTON, R.; BRISTOW, K. L.; KLUITENBERG, G. J.; SAUER, T. J. Crop residue effects on surface radiation and energy balance – review. **Theor. Appl. Climatol.**, v. 54, pp. 27-37, 1996.
- JACKSON, N. A. Measured and modelled rainfall interception loss from na agroforestry system in Kenya. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 100, pp. 323–336, 2000.
- JUNIOR, N. K.; ALVES, F. V.; KLOSOWSKI, E. S.; ALMEIDA, R. G.; TSUTSUMI, C. Y.; OLIVEIRA, C. C. Microclima e índices de conforto térmico em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no município de Campo Grande, Mato Grosso do Sul. **Documentos 225, Embrapa Gado de Corte**. Brasília, DF, 2016.
- KOU, W.; SHEN, Z.; ZHANG, Y.; WANG, H.; JI, P.; HUANG, L.; ZHANG, C.; MA, Y. Spatio-temporal analysis of agroforestry systems in hotan using multi-source remote sensing and deep learning. **Smart Agricultural Technology**, v. 9, 100641, 2024.
- LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. 3^a ed. Edusp – Editora da Universidade de São Paulo, 2018.
- LIN, B. B. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 144, pp. 85–94, 2007.
- LEITE, P. H. M. Influência da sombra do dossel temporário de um sistema agroflorestal na maturação de frutos de café. Dissertação de mestrado, UFSCar. 50 p, 2021.
- LOAIZA PUERTA, V. *et al.* Improvement of soil structure through organic crop management, conservation tillage and grassclover ley. **Soil and Tillage Research**, 180:1-9, 2018.
- LOPES, V.; PEREIRA, F.; GOMES, L.; MOREIRA, G.; CARDOSO, I. Níveis de sombreamento em cafezais cultivados em sistemas agroflorestais e a pleno sol. **Cadernos de**

Agroecologia – ISSN 2236-7934 – Anais do VI CLAA, X CBA e V SEMDF – Vol. 13, Nº 1, Jul. 2018.

LOURENÇO, P.; GODINHO, S.; SOUSA, A.; GONÇALVES, A. C. Estimating tree aboveground biomass using multispectral satellite-based data in Mediterranean agroforestry system using random forest algorithm. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 23, 100560, 2021.

MACKINNEY, A. L. Effects of Forest Litter on Soil Temperature and Soil Freezing in Autumn and Winter. **Ecology**, Vol. 10, No. 3, pp. 312-321, Jul., 1929.

MANNERING, J. V.; MEYER, L. D. The Effects of Various Rates of Surface Mulch on Infiltration and Erosion. In: **Soil Science Society Proceedings**, 3 p., 1963.

MARINO, S.; COCOZZA, C.; TOGNETTI, R.; ALVINO, A. Use of proximal sensing and vegetation indexes to detect the inefficient spatial allocation of drip irrigation in a spot area of tomato field crop. **Precision Agric**, v. 16, pp. 613-629, 2015.

MARTIUS, C.; HÖFER, H.; GARCIA, M. V. B.; RÖMBKE, J.; FÖRSTER, B.; HANAGARTH, W. Microclimate in agroforestry systems in central Amazonia: does canopy closure matter to soil organisms? **Agroforestry Systems**, v. 60, pp. 291–304, 2004.

MELOTTO, A. M.; VERONKA, D. A.; LAURA, V. A. Efeito de diferentes níveis de sombreamento natural no microclima de um sistema agroflorestal. In: **Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais**, Embrapa Gado de Corte, 2009. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/697113/efeito-de-diferentes-niveis-de-sombreamento-natural-no-microclima-de-um-sistema-agroflorestal>. Acesso em 28/02/2025.

MICCOLIS, A. *et al.* **Restauração Ecológica com Sistemas Agroflorestais** – Como conciliar conservação com produção. Opções para Cerrado e Caatinga. Guia Técnico. Brasília: Instituto Sociedade, População e Natureza – ISPN/Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal – ICRAF, 2016.

MONTEITH, J. L.; ONG, C. K.; CORLETT, J. E. Microclimatic interactions in agroforestry systems. **Forest Ecology and Management**, v. 45, pp. 31-44, 1991.

- MÜLLER, J. S. Sistemas agroflorestais com café (*Coffea arabica* L.) e cedro-australiano (*Toona ciliata* M. Roem. var. *australis* (F. Muell.) Bahadur) na Zona da Mata de Minas Gerais: um estudo de caso. Dissertação de mestrado, UFV. 61 p., 2004.
- MUÑOZ-VILLERS, L. E.; GERIS, J.; ALVARADO-BARRIENTOS, M. S.; HOLWERDA, F.; DAWSON, T. E. Coffee and shade trees show complementary use of soil water in a traditional agroforestry ecosystem. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 24, 1649–1668, 2020.
- NIETHER, W.; ARMENGOT, L.; ANDRES, C.; SCHNEIDER, M.; GEROLD, G. Shade trees and tree pruning alter throughfall and microclimate in cocoa (*Theobroma cacao* L.) production systems. **Annals of Forest Science**, 75(2), 2018.
- NUNES, D. N. *et al.* Experiência de consolidação da Rede de Mutirões Agroecológicos em Viçosa-MG. **Revista Brasileira de Extensão Universitária**, v. 13, n. 3, p. 303-315, set.–dez., 2022.
- ONG, C. K.; WILSON, J.; DEANS, J. D.; MULAYTA, J.; RAUSSEN, T.; WAJJA-MUSUKWE, N. Tree–crop interactions: manipulation of water use and root function. **Agricultural Water Management**, v. 53, pp. 171–186, 2002.
- ONWUKA, B. M. Effects of soil temperature on Some Soil properties and plant growth. **Scholarly Journal of Agricultural Science**, Vol. 6(3), pp. 89-93 July, 2016.
- OTTONI FILHO, T. B. *et al.* Revisiting field capacity (FC): variation of definition of FC and its estimation from pedotransfer functions. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 38, pp. 1750-1764, 2014.
- OWOR, M.; TAYLOR, R. G.; TINDIMUGAYA, C.; MWESIGWA, D. Rainfall intensity and groundwater recharge: empirical evidence from the Upper Nile Basin. **Environmental Research Letters**, v. 4, 2009.
- PÁDUA, L.; VANKO, J.; HRUSKA, J.; ADÃO, T.; SOUSA, J. J.; PERES, E.; MORAIS, R. UAS, sensors, and data processing in agroforestry: a review towards practical applications. **International Journal of Remote Sensing**, v., 38, pp. 2349–2391, 2017.
- PAULILO, M. T. S.; VIANA, A. M.; RANDI, A. M. **Fisiologia vegetal**. Ed. Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- PETTIT, A. N. A non-parametric approach to the change point problem. **Appl. Statist.**, v. 28, n. 2, pp. 126-135, 1979.

PIRES, C. V. Dinâmica hídrica de uma sequência latossólica sob pastagem em uma bacia hidrográfica da Zona da Mata Mineira. Tese de Doutorado, DPS/UFV. 89 p., 2016.

POHLERT, T. **trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection**. R package version 1.1.6, 2023. <https://CRAN.R-project.org/package=trend>

PREVEDELLO, C. L. Energia térmica do solo. In: **Física do Solo**. Ed. Van Lier, Q. J. SBCS, Viçosa, 2010.

PULROLNIK, K. **Transformações do Carbono no Solo**. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF. 1ª edição, 36p. 2009.

QIU, G. Y.; BEM-ASHER, J.; YANO, T.; MOMII, K. Estimation of Soil Evaporation Using the Differential Temperature Method. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v., 63, pp. 1608-1614, 1999.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2024. <https://www.R-project.org/>

REBELLO, J. F. S.; SAKAMOTO, D. G. **Agricultura Sintrópica segundo Ernst Götsch**. 2ª ed. Edições Aguará, 175 p., 2022.

REZENDE, C. H. S. **Determinação da capacidade de campo em latossolos com diferentes texturas**. Dissertação M. Sc. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa. 2016.

RIGBY, H.; CLARKE, B. O.; PRITCHARD, D. L.; MEEHAN, B.; BESHAN, F.; SMITH, S. R.; PORTER, N. A. critical review of nitrogen mineralization in biosolids-amended soil, the associated fertilizer value for crop production and potential for emissions to the environment. **Science of The Total Environment**, v. 541, pp. 1310-1338, 2016.

RIGHI, C. A.; LUNZ, A. M. P.; BERNARDES, M. S.; PEREIRA, C. R.; TERAMOTO, E. R.; FAVARIN, J. L. Coffee water use in agroforestry system with rubber trees. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v. 32, n. 4, p. 781-792, 2008.

SAKIYAMA, N. S. O café arábica. In: **Café Arábica: do plantio à colheita**. Eds: Sakiyama, N.; Martinez, H.; Tomaz, M.; Borém, A. Editora UFV, 2015.

SANTANA, F. C. **Dinâmica da água no solo e modelagem digital da radiação em sistemas agroflorestais com café**. Dissertação M. Sc. Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, Universidade Federal de Viçosa. 2016.

SANTOS, K. F. A. **O manejo do ambiente luminoso em sistemas agroflorestais de usos múltiplos**. Dissertação de mestrado, ESALQ/USP. 146 p. 2022.

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Projeto Integrado de Pesquisa e Desenvolvimento em Agricultura Familiar (PROPEDAF) – Relatório Técnico Subprojeto 01**. Viçosa: FUNARB/EPAMIG, 79p, 2002.

SHARMA, P.; BHARDWAJ, D. R.; SINGH, M. K.; NIGAM, R.; PALA, N. A.; KUMAR, A.; VERMA, K.; KUMAR, D.; THAKUR, P. Geospatial technology in agroforestry: status, prospects, and constraints. **Environmental Science and Pollution Research**, April, 2022.

SILES, P.; VAAST, P.; DREYER, E.; HARMAND, J. M. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss in a coffee (*Coffea arabica L.*) monoculture compared to an agroforestry system with *Inga densiflora*. **Journal of Hydrology**, v. 395, pp. 39–48, 2010.

SILVA, C. S. **Caderno de Metodologia dos Mutirões Agroecológicos**. Ed. da autora, 2023.

SIRIRI, D.; WILSON, J.; COE, R.; TENYWA, M. M.; BEKUNDA, M. A.; ONG, C. K.; BLACK, C. R. Trees improve water storage and reduce soil evaporation in agroforestry systems on bench terraces in SW Uganda. **Agroforest Syst**, v. 87, pp. 45-58, 2013.

SISHODIA, R. P.; RAY, R. L.; SINGH, S. K. Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. **Remote Sens.**, v. 12, 3136, 2020.

SOUZA, H. N. *et al.* Selection of native trees for intercropping with coffee in the Atlantic Rainforest biome. **Agroforest Syst**, v. 80, p. 1-16, 2010.

SOUZA, V. Q.; CARON, B. O.; SCHMIDT, D.; BEHLING, A.; BAMBERG, R.; VIAN, A. L. Resistência de espécies arbóreas submetidas a extremos climáticos de geada em diferentes sistemas agroflorestais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 6, pp. 972-977, jun, 2011.

STÖCKER, C. M. *et al.* Short-term soil physical quality improvements promoted by an agroforestry system. **Agroforest Syst.**, 94:2053–2064, 2020.

SUPRAYOGO, D.; AZMI, E. N.; ARIESTA, D. A.; SUTEJO, Y. A.; HAKIM, A. L.; PRAYOGO, C.; MCNAMARA, N. P. Tree and plant interactions in the agroforestry system: does the management of coffee intensification disrupt the soil hydrological system and pine growth? IOP Conf. Series: **Earth and Environmental Science**, 449, 012045, 2020.

- THORUD, D. B. Effects of Pruning on Rainfall Interception in a Minnesota Red Pine Stand. **Forest Science**, volume 9, number 4, 1963.
- TISDAL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, 33, 141-163, 1982.
- TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4ª edição, 9ª reimpressão. Editora ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, Brasil. 1993.
- TULLY, K. L.; LAWRENCE, D. Canopy and leaf composition drive patterns of nutrient release from pruning residues in a coffee agroforest. **Ecological Applications**, 22(4), pp. 1330–1344, 2012.
- VAAST, P.; KANTEN, R.; SILES, P.; DZIB, B.; FRANCK, N.; HARMAND, J. M.; GENARD, M. Shade: a key factor for coffee sustainability and quality. **Proc. 20th Int. Cong. Coffee Research**, Bangalore, India, ASIC, Paris, France, pp 145–155, 2004.
- WALKER, T. W. N.; KAISER, C.; STRASSER, F.; HERBOLD, C. W.; LEBLANS, N. I. W.; WOEBKEN, D.; JANSSENS, I. A.; SIGURDSSON, B. D.; RICHTER, A. Microbial temperature sensitivity and biomass change explain soil carbon loss with warming. **Nature Climate Change**, v. 8, pp. 885-889, october 2018.
- WAKTOLA, T. U.; FEKADU, K. Adoption of Coffee Shade Agroforestry Technology and Shade Tree Management in Gobu Seyo District, East Wollega, Oromia. *Advances in Agriculture*, ID 8574214, 13 p., 2021.
- WALDRON, A.; GARRITY, D.; MALHI, Y.; GIRARDIN, C.; MILLER, D. C.; SEDDON, N. Agroforestry Can Enhance Food Security While Meeting Other Sustainable Development Goals. **Tropical Conservation Science**, v. 10, 2017.
- WEZEL, A. et al. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, 29(4), p. 503–515, 2009.
- ZANELLA, J. B.; COELHO, G. C. The effect of plant biomass from pruning of trees on maize (*Zea mays* L.) and weeds. **Rev. Bras. de Agroecologia**, 9(3): 54-62, 2014.

CONCLUSÕES GERAIS

O presente trabalho buscou avançar nas pesquisas sobre sistemas agroflorestais (SAFs) a partir da inclusão da variável “manejo”, aqui representada pelos fatores estágio sucessional da área e manejo de podas realizado. Ambos fatores são princípios fundamentais da Agricultura Sintrópica (AS), modelo de produção agrícola centrado na sucessão ecológica que visa aproximar as características ecológicas dos ecossistemas naturais aos sistemas agrícolas produtivos. Nesse contexto, reforçou-se a ideia de que SAFs são dinâmicos no tempo e no espaço e a inclusão destes fatores cria novas possibilidades de análise dentro dos estudos em SAFs.

O avanço no estágio sucessional das áreas de agrofloresta estudadas mostram como as propriedades físicas do solo evoluem no tempo nesse tipo de manejo, resultando especificamente em menores densidades do solo, maiores porosidades e condutividades hidráulicas saturadas. Os resultados foram constatados também na análise das curvas de retenção ajustadas, com destaque para o aumento do índice S e da umidade na condição de saturação (θ_s). Essas características são desejáveis do ponto de vista ambiental, pois favorecem fluxos de infiltração e percolação que reduzem a degradação do solo por erosão superficial. E são desejáveis também do ponto de vista agrônomo pois possibilitam maior crescimento e alongamento de raízes no solo.

Os principais mecanismos pelos quais as características físicas do solo são melhoradas ao longo do tempo são o incremento do teor de matéria orgânica do solo e a presença de bioporos. Ambos são resultantes do manejo de podas e de complexificação e estratificação dos sistemas propostos pela AS. Quando comparados com o uso do solo de referência na região (pastagem), fica nítido o benefício ambiental promovido pela AS, com poder de recuperação rápido dos solos, mesmo em locais com condições iniciais de solo degradado. Conclui-se, portanto, que a AS é uma excelente ferramenta para conservação de solo e água na Zona da Mata Mineira.

Para estudos futuros nesta linha, sugeriu-se o aprofundamento das camadas do solo analisadas, de modo a identificar até que profundidade as propriedades físicas do solo são alteradas por este tipo de manejo. Tal informação pode apoiar a quantificação de serviços ecossistêmicos promovidos pela AS, ao mesmo tempo que orientar o manejo de outras áreas em processo de regeneração. A estimativa da capacidade de campo a partir da curva de retenção de água no solo na tensão de -10 kPa se mostrou subestimada para as camadas de 10 cm e 80 cm quando confrontada com os resultados de umidade monitorados, devendo ser melhor avaliada em

estudos futuros. Outra sugestão é a análise aprofundada de indicadores químicos e biológicos do solo, além de resultados econômicos/produtivos, que complementam o presente estudo tanto do ponto de vista ambiental quanto agrônomo e socioeconômico.

A realização do manejo de podas e o monitoramento por um ano de SAFs de distintos estágios sucessionais trouxe informações importantes quanto às dinâmicas térmica e hídrica de SAFs. A precipitação interna nas áreas não manejadas variou entre 72% e 80%, representando grande perda de água para o sistema por interceptação das árvores. Nas áreas manejadas, os coeficientes foram de 89% a 96%. A maior chegada de água por precipitação nas áreas manejadas influenciou na quantidade de dias em que a frente de molhamento chegou principalmente na camada de 10 cm, em todas as parcelas monitoradas.

Os teores de umidade em uma das parcelas se mostraram nitidamente destoante dos demais, o que foi associado a um efeito de sítio local. Ignorando-se a parcela destoante, houve influência na permanência de umidade na camada de 10 cm - em menor proporção - e na de 80 cm - em maior proporção -, o que mostrou que o excesso de água que percolou no solo foi consumido pelas culturas e/ou drenado para camadas mais profundas do solo. De ambas as formas, são benefícios promovidos para o sistema agrônomo e natural, respectivamente, pelo manejo de podas realizado. O sistema mais complexo apresentou sistematicamente teores maiores de umidade no solo do que o sistema simplificado, reforçando a ideia da AS como ferramenta eficaz para manutenção de solo e água.

Novos estudos dentro desta linha devem considerar arranjos experimentais que sejam capazes de lidar com variações em curtos espaços, bem como comprovar os efeitos observados no presente trabalho. A maior entrada de água proporcionada pela redução da interceptação após o manejo de podas foi suficiente para superar eventuais aumentos de evapotranspiração decorrente da maior incidência de radiação solar. Mais investigações são necessárias nesse sentido para quantificar com precisão fluxos de consumo de água pelas plantas e de incidência de radiação no solo visando a quantificação da evaporação direta.

A abertura do dossel dos SAFs através do manejo resultou em maior radiação solar incidente nas áreas, verificada a partir das maiores temperaturas médias e máximas diárias do solo e do ar. Estes efeitos foram considerados imediatos, com quebra de tendências de médias verificada a partir do teste estatístico de Pettitt a 5%. Apesar da maior exposição à radiação após o manejo de podas, as diferenças de temperaturas médias entre as áreas manejadas e não manejadas foram inferiores aos valores encontrados na literatura comparando SAFs e monoculturas de café,

mostrando que mesmo imediatamente após o manejo de podas drásticas realizado ainda são verificados benefícios ambientais à cafeicultura da Zona da Mata Mineira neste tipo de sistema. As temperaturas máximas monitoradas podem ter sido superestimadas, devido a utilização de abrigos meteorológicos de baixo custo, entretanto, ainda assim sugerem o efeito de regulação microclimática promovido pelas áreas mais complexificadas. Para estudos futuros nesta linha recomendou-se a instalação de estações meteorológicas completas e automatizadas, contemplando um maior conjunto de variáveis e melhor acompanhamento do estado da bateria e dos sensores.

O imageamento das áreas com câmeras térmica e multiespectral identificou que índices de vegetação se mantêm mais elevados e as temperatura menores nos sistemas mais avançados. No SAF mais simplificado, as podas culminaram em temperaturas acima do limite fisiológico do cafeeiro e índices de vegetação abaixo do limite após o período de estiagem. Os resultados reforçam a ideia da AS como ferramenta para conservação de solo e água na Zona da Mata Mineira, ao mesmo tempo que proporciona condições para o bom desenvolvimento das culturas.

Por fim, destaca-se que não se deve encarar a poda isoladamente como forma de manejo, mas sim inserida no arcabouço geral da AS, que envolve o plantio em diversidade, em abundância e mirando-se na estratificação e sucessão das áreas tal como os sistemas ecológicos naturais. Quando estes princípios estão presentes de forma sincronizada, o manejo de podas pode – e deve – ser realizado sem prejuízo à qualidade dos cultivos. Cabe ao(à) agricultor(a) identificar os momentos em que se deve manejar o sistema através das podas.