



INDIRA PEREIRA DE OLIVEIRA

**CARBON ACCUMULATION IN COFFEE CULTIVATION
UNDER DIFFERENT MANAGEMENT SYSTEMS**

LAVRAS – MG

2026

INDIRA PEREIRA DE OLIVEIRA

**CARBON ACCUMULATION IN COFFEE CULTIVATION UNDER DIFFERENT
MANAGEMENT SYSTEMS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, área de Cafeicultura, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador
Pesq. DSc. Gladyston Rodrigues Carvalho

Coorientador
Pesq. DSc. Regis Pereira Venturin

**LAVRAS – MG
2026**

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

Oliveira, Indira Pereira de.
carbon accumulation in coffee cultivation under different management systems /
Indira Pereira de Oliveira. - 2026.
103 p.

Orientador: Gladyston Rodrigues Carvalho
Coorientador: Regis Pereira Venturin

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. coffea arabica L.. 2. sequestro de carbono. 3. sistemas agroflorestais. 4.
fotossíntese. 5. manejo do solo. I. Carvalho, Gladyston Rodrigues. II. Venturin, Regis
Pereira. III. Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

INDIRA PEREIRA DE OLIVEIRA

**ACÚMULO DE CARBONO NA CAFEICULTURA SOB DIFERENTES
SISTEMAS DE MANEJO**

**CARBON ACCUMULATION IN COFFEE CULTIVATION UNDER DIFFERENT
MANAGEMENT SYSTEMS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, área de Cafeicultura, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 24 de abril de 2026.

DSc. Dalysse Toledo Castanheira Banca Um

DSc. Guilherme Barbosa Abreu Banca Dois

DSc. Guilherme Lopes Banca Três

DSc. Rodrigo Luz da Cunha Banca Quatro

UFLA

EMBRAPA

UFLA

EPAMIG Sul

Orientador

Pesq. DSc. Gladyston Rodrigues Carvalho

Coorientador

Pesq. DSc. Regis Pereira Venturin

**LAVRAS – MG
2026**

*Ao meu bebê, que cresce em mim e que, mesmo sem saber, deu um novo e mais profundo
significado a este esforço e a todas as minhas conquistas*
Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Lavras – UFLA, ao Departamento de Agricultura – DAG e ao Programa de Pós- Graduação em Fitotecnia da UFLA – PPGF/UFLA, pela estrutura oferecida e pela oportunidade de realização do Doutorado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG). Agradeço a Capes, CNPq, INCT CAFÉ-MIC (Mitigação dos Impactos Climáticos) e FAPEMIG pelo financiamento, suporte e pela concessão da bolsa de estudos, que tornou possível a realização do Doutorado.

RESUMO

A cafeicultura enfrenta desafios crescentes devido às mudanças climáticas, exigindo sistemas de produção que conciliem produtividade e sequestro de carbono (C). Esta tese objetivou avaliar a influência de sistemas de implantação e condução de lavouras cafeeiras sobre o acúmulo de C, propriedades físico-químicas do solo e parâmetros fisiológicos das plantas. O estudo foi estruturado em três artigos científicos conduzidos nos municípios de Santo Antônio do Amparo e em São Sebastião do Paraíso, ambos em Minas gerais. No Artigo um, quantificou-se o estoque de C em sistemas agroflorestais (SAFs), verificando que o consórcio com mogno-africano promoveu maior acúmulo de carbono na biomassa do cafeeiro ($25,94 \text{ t C ha}^{-1}$ na planta), enquanto o acrocarpus potencializa o sequestro subsuperficial no solo ($54,4 \text{ t C ha}^{-1}$ no solo da lavoura). No Artigo dois, analisou-se o manejo de plantas espontâneas, evidenciando que o sistema sem capina promove a maior estabilização de C no perfil do solo em comparação ao uso de herbicidas residuais. O Artigo três integrou a análise de solo com parâmetros fotossintéticos, revelando que os sistemas consorciados e o manejo conservacionista preservam a microporosidade, resultando em maior eficiência quântica e taxas de fixação de CO_2 . Conclui-se que a diversificação vegetal, seja por árvores ou cobertura espontânea, pode tornar a cafeicultura um sistema eficiente de absorção de carbono, aumentando a resiliência do agroecossistema. A integração da ecofisiologia com a dinâmica do solo prova que a proteção do ambiente edáfico é o suporte para a sustentabilidade produtiva e aumento no estoque de carbono nos sistemas em regiões tropicais.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L.; Sistemas Agroflorestais; Sequestro de Carbono; Fotossíntese; Manejo do Solo.

ABSTRACT

Coffee production faces increasing challenges due to climate change, requiring production systems capable of reconciling productivity and carbon (C) sequestration. This thesis aimed to evaluate the influence of different coffee cropping and management systems on carbon accumulation, soil physicochemical properties, and plant physiological parameters. The study was structured into three scientific articles conducted in the municipalities of Santo Antônio do Amparo and São Sebastião do Paraíso, Minas Gerais, Brazil. In the first article, carbon stocks were quantified in agroforestry systems (AFS), demonstrating that the consortium with African mahogany promoted greater carbon accumulation in coffee biomass (25.94 t C ha⁻¹ in the plant), while *Acrocarpus* enhanced subsurface soil carbon sequestration (54.4 t C ha⁻¹ in the soil). In the second article, weed management strategies were evaluated, showing that the no-weeding system promoted greater carbon stabilization in the soil profile compared to residual herbicide use. The third article integrated soil analyses with photosynthetic parameters, revealing that agroforestry systems and conservation management practices preserved soil microporosity, resulting in higher quantum efficiency and CO₂ fixation rates. Overall, the results demonstrate that plant diversification, whether through tree integration or maintenance of spontaneous vegetation cover, can make coffee production systems more efficient in carbon sequestration and increase agroecosystem resilience. The integration of ecophysiology and soil carbon dynamics highlights the importance of soil conservation as a key factor for productive sustainability and enhanced carbon storage in tropical agricultural systems.

Keywords: *Coffea arabica* L.; Agroforestry Systems; Carbon Sequestration; Photosynthesis; Soil Management.

INDICADORES DE IMPACTO

Os resultados desta tese evidenciam que a adoção de sistemas de manejo mais diversificados e conservacionistas na cafeicultura influencia diretamente a dinâmica do carbono no sistema solo-planta, gerando impactos ambientais, tecnológicos, produtivos e econômicos. No âmbito ambiental, verifica-se que sistemas agroflorestais e manejos com menor intervenção, como a manutenção das plantas espontâneas, promovem maior acúmulo de carbono no solo, na biomassa vegetal e na serapilheira, inclusive em camadas mais profundas e estáveis, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Observa-se que diferenças expressivas nos estoques de carbono entre manejos indicam elevado potencial de sequestro de carbono em sistemas cafeeiros manejados de forma sustentável. No aspecto tecnológico, a pesquisa gera subsídios científicos consistentes para o aprimoramento das recomendações técnicas, especialmente quanto à escolha de espécies em sistemas consorciados e às estratégias de manejo da entrelinha, permitindo maior eficiência no uso dos recursos naturais. No âmbito produtivo e econômico, evidencia-se que práticas como o uso de roçadeira e a manutenção parcial das plantas espontâneas favorecem o desenvolvimento vegetativo e a produtividade do cafeeiro, ao mesmo tempo em que podem reduzir a dependência de insumos externos, enquanto o uso intensivo de herbicidas pode comprometer a qualidade do solo e a sustentabilidade do sistema a médio e longo prazo. Adicionalmente, identifica-se relação direta entre maiores teores de carbono no solo e maior eficiência no uso da água pelo cafeeiro, indicando maior resiliência do sistema frente a estresses climáticos. Os resultados apresentam caráter extensionista ao possibilitar aplicação direta por produtores, técnicos e extensionistas, com impactos concentrados nas regiões cafeeiras, especialmente no sul de Minas Gerais, e potencial de expansão para outras áreas produtoras. A pesquisa alinha-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, contribuindo para a promoção da agricultura sustentável, uso responsável dos recursos naturais, mitigação das mudanças climáticas e conservação dos ecossistemas terrestres.

IMPACT INDICATORS

The results of this thesis demonstrate that the adoption of more diversified and conservation-oriented management systems in coffee farming directly influences carbon dynamics within the soil–plant system, generating environmental, technological, productive, and economic impacts. From an environmental perspective, it is observed that agroforestry systems and management practices with reduced intervention, such as the maintenance of spontaneous vegetation, promote greater carbon accumulation in the soil, plant biomass, and litter, including deeper and more stable soil layers, thereby contributing to climate change mitigation. Significant differences in carbon stocks among management systems indicate a high potential for carbon sequestration in sustainably managed coffee systems. From a technological standpoint, the research provides consistent scientific evidence to support improved technical recommendations, particularly regarding species selection in intercropping systems and inter-row management strategies, enabling more efficient use of natural resources. In terms of productivity and economic outcomes, practices such as mechanical mowing and partial maintenance of spontaneous vegetation are shown to favor vegetative growth and coffee yield, while reducing dependence on external inputs, whereas intensive herbicide use may compromise soil quality and system sustainability in the medium and long term. Additionally, a direct relationship is identified between higher soil carbon levels and improved water use efficiency in coffee plants, indicating greater system resilience under climate stress conditions. The findings present an extension-oriented character, as they can be directly applied by farmers, technicians, and extension agents, with impacts concentrated in coffee-producing regions, particularly in southern Minas Gerais, and potential for expansion to other producing areas. The research aligns with the Sustainable Development Goals, contributing to the promotion of sustainable agriculture, responsible use of natural resources, climate change mitigation, and the conservation of terrestrial ecosystems.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE.....	16
1	INTRODUÇÃO.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	A cultura do café e características do café arábica.....	17
2.2	Cafeicultura e mudanças climáticas.	19
2.3	Manejos de plantas associadas na lavoura cafeeira.....	20
2.4	Cafeicultura consorciada e sistema agroflorestal.....	21
	SEGUNDA PARTE.....	24
	ARTIGO 1 - Acúmulo de carbono em lavoura cafeeira consorciada com espécies florestais.....	24
	ARTIGO 2 - Acúmulo de carbono na cafeicultura sob diferentes manejos de plantas espontâneas.....	50
	ARTIGO 3 - Weed management influences the accumulation of organic matter in the soil and productivity in coffee farming.....	72
	TERCEIRA PARTE.....	94
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	94
	REFERÊNCIAS.....	97

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura ocupa uma posição de destaque no cenário agropecuário nacional. Segundo o 2º levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2025) para a safra 2025, a área total destinada à cultura no Brasil é de 2,25 milhões de hectares. Desse total, 1,86 milhão de hectares referem-se a lavouras em produção e 0,391 milhão a áreas em formação. Embora a área total tenha apresentado um incremento de 0,8% em relação ao ciclo anterior, nota-se uma dinâmica distinta entre os setores: enquanto as áreas em formação cresceram 12,3%, as áreas em produção sofreram uma retração de 1,4%.

Em Minas Gerais, principal estado produtor de café do país, a produção deve atingir 26,09 milhões de sacas em 2025, volume que representa uma queda de 7,1% comparado ao ciclo anterior. O estado dedica 1,34 milhão de hectares ao café, distribuídos entre 1,06 milhão em produção e 0,319 milhão em estágio de formação (Conab, 2025).

Apesar da relevância econômica, a produção de café arábica enfrenta desafios crescentes devido à sua sensibilidade à variabilidade climática. Extremos de temperatura e de precipitação podem comprometer desde o florescimento até a qualidade final dos grãos (TAVARES et al., 2018). Diante dessa vulnerabilidade, a adoção de práticas sustentáveis tornou-se urgente. Ao buscar a conservação dos recursos naturais e a adaptação às mudanças climáticas, estabelece-se uma relação de benefício mútuo: o produtor fortalece a resiliência e a produtividade de sua lavoura, assegurando a viabilidade do sistema a longo prazo.

Esse cenário de alerta é reforçado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), que aponta a última década como o período de maiores emissões de gases de efeito estufa da história, elevando drasticamente a concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. As consequências diretas para a agricultura global incluem a redução da produtividade, a perda de qualidade das colheitas e o aumento da pressão de pragas e doenças.

Projeções indicam que o aquecimento global atingirá 1,5 °C entre 2021 e 2040, intensificando inevitavelmente os perigos climáticos. Em regiões tropicais, o aumento de temperatura tem sido de 0,5 °C por década, com eventos extremos cada vez mais severos.

Como exemplo, o fenômeno El Niño de 2015 registrou temperaturas 1,5 °C superiores às observadas no evento de 1997 (IPCC, 2023).

A cafeicultura também pode atuar como fonte relevante de gases de efeito estufa, sobretudo de óxido nitroso (N₂O), cujas emissões estão associadas ao uso de fertilizantes nitrogenados e às condições de umidade do solo, evidenciando a necessidade de estratégias de manejo que reduzam a pegada climática da produção (SAN MARTIN RUIZ et al., 2021).

Para mitigar tais impactos, têm sido propostas estratégias que visam aumentar os estoques de carbono nos cafezais, como sistemas agroflorestais, consórcios nas entrelinhas e manejos de solo conservacionistas. Tais práticas promovem a preservação de nutrientes e da água, além de elevar os teores de carbono orgânico no solo. Como resultado, observa-se a manutenção da microbiota e uma melhor disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Nesse contexto, o estudo do estoque de carbono torna-se fundamental para quantificar o armazenamento de CO₂ na biomassa (cafeeiro e espécies consorciadas), no solo e na serrapilheira. Esses componentes atuam como importantes sumidouros de carbono atmosférico, auxiliando na redução dos gases de efeito estufa (AWAZI 2025).

Diante do exposto, o presente trabalho avaliou os efeitos de sistemas agroflorestais e de diferentes práticas de manejo de plantas associadas ao café. As análises abrangeram o crescimento das plantas e as características fisiológicas, o acúmulo de carbono no sistema, as características físicas e químicas do solo e a produtividade da cultura. A comparação entre esses atributos fornece estimativas essenciais sobre o potencial de estoque de carbono de cada sistema estudado.

O trabalho teve como objetivo: 1- verificar a diferença de acúmulo de carbono entre os diferentes manejo e formas de implantação da lavoura cafeeira; 2- definir o padrão de uma lavoura cafeeira com alta concentração de carbono estocado; 3- determinar como o acúmulo de carbono no solo influencia o funcionamento fisiológico do cafeeiro, especialmente em relação à eficiência no uso da água.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A cultura e características do café arábica

O conhecimento sobre a planta do café e suas características é fundamental para compreender temas práticos relacionados ao seu cultivo, assim como questões relacionadas à interação com o ambiente e suas respostas a estresses bióticos e abióticos.

A planta de café foi descoberta na África e eventualmente disseminada para outros países ao redor do mundo. O cafeeiro faz parte do sub-reino das plantas conhecido cientificamente como angiosperma ou Angiospermae, pertence à família Rubiaceae e ao gênero *Coffea*. A família botânica Rubiaceae inclui cerca de 500 gêneros e mais de 6.000 espécies, sendo classificada na subfamília Ixoroideae e, o gênero *Coffea* é, de longe, o membro de maior importância econômica tendo atualmente pelo menos 125 espécies (DAVIS et al. 2019).

Das espécies catalogadas no gênero *Coffea*, apenas três possuem importância comercial: *Coffea arabica*, *Coffea canephora* e, em grau muito menor, *Coffea liberica*, sendo a primeira a cultura mais cultivada por apresentar melhor qualidade de bebida (VU et al., 2023). Contudo, comparada ao *C. canephora*, a espécie arábica implica em ser uma planta menos resistente às variações ambientais, mais propensa a pragas e doenças além de possuir um ciclo reprodutivo de bienalidade de produção, sendo um ano de alta produtividade e o ano consecutivo de baixa produtividade (GRÜTER et al., 2022).

Coffea arabica é uma espécie de origem híbrida, resultante do cruzamento natural entre *Coffea canephora* e *Coffea eugenioides*. Essa origem confere à espécie características particulares, como menor variabilidade genética e maior suscetibilidade a estresses bióticos e abióticos quando comparada a outras espécies do gênero. Em contraste, *Coffea canephora* apresenta maior variabilidade genética e, conseqüentemente, maior adaptabilidade às condições ambientais adversas (LASHERMES et al., 1999; SCALABRIN et al., 2020).

A relevância econômica do *C. arabica* é indiscutível no cenário global, sendo a espécie responsável por mais de 60% da produção mundial de café (VU et al., 2023). Devido à expressiva importância agrônômica e comercial associada à região de desenvolvimento dos trabalhos, esta pesquisa concentra-se exclusivamente no café arábica. Caracterizada por um porte que pode atingir até seis metros de altura em estado natural, a espécie encontra seu habitat ideal em regiões de altitudes elevadas e climas de temperaturas amenas. Contudo, essa especificidade ambiental delimita a sua área de cultivo e acentua a necessidade de sistemas de manejo que protejam a planta contra as oscilações ambientais e promovam a sustentabilidade produtiva.

2.2 Cafeicultura e mudanças climáticas

Mudanças climáticas e estimativas de aquecimento global para o presente século levantam importantes incertezas relacionadas à sustentabilidade futura da produção agrícola. O rendimento do café é fortemente determinado pelas condições climáticas durante as fases vegetativa e reprodutiva da planta, controlando também a incidência de pragas e doenças, como a ferrugem do café e a broca, que podem reduzir a produtividade e a qualidade do café e aumentar os custos de produção (TAVARES et al 2018).

O café é cultivado por pequenos e médios produtores na África, Ásia e Américas com muitos deles tendo o cultivo de café como sua principal fonte de renda. Com isso, desencadeiam as preocupações acerca dos impactos negativos das mudanças climáticas na produtividade do cafeeiro, pois além dos benefícios sociais e econômicos, os cafezais geram serviços ecossistêmicos significativos, incluindo a conservação da biodiversidade (JHA et al., 2014), sequestro de carbono (VAN RIKXOORT et al., 2014) e proteção do solo (MEYLAN et al., 2017).

Estudos recentes preveem reduções importantes de áreas adequadas ao cultivo e aumentos na incidência de pragas, além de uma redução nas áreas com precipitação média anual efetiva para a produção de café, amplamente relacionadas ao aumento da temperatura média do ar, variabilidade sazonal de temperatura e disponibilidade de água (BUNN et al., 2015; CRAPARO et al., 2015; MAGRACH e GHAZOUL, 2015; MARTINS et al., 2017), com impacto nos meios de subsistência de milhões de produtores.

Dessa forma, a utilização de sistemas de implantação e condução da lavoura cafeeira que possibilitam a produção de café sob a influência de estresses climáticos e, que contribuam com a mitigação desses impactos negativos das mudanças climáticas é essencial para a manutenção da sustentabilidade agrícola (MARTINS et. al., 2018).

Buscando a conservação da água e do solo que impactam diretamente nas mudanças climáticas, recomendam-se práticas conservacionistas fundamentadas em três princípios básicos: aumento da cobertura vegetal no solo, melhora na infiltração de água no solo e, manutenção da rugosidade do terreno cultivado que (reduz a velocidade e o volume do escoamento superficial e aprisiona os sedimentos da erosão. Essas práticas estão atreladas aos diferentes tipos de manejos da lavoura que surgem como alternativas ao cultivo convencional, apontado como causador de degradação de solos e impactos negativos quanto ao uso da água,

além de contribuir com uma maior pegada de carbono na agricultura (LIMA et al., 2017; FERREIRA et. al., 2021).

Estudos indicam que as emissões de gases de efeito estufa associadas à cafeicultura no Brasil variaram entre 16 e 22 milhões de toneladas de CO₂ equivalente em diferentes safras (MARTINS et al., 2018), evidenciando a magnitude das emissões provenientes desse sistema produtivo. Nesse contexto, a região Sudeste se destaca como a principal contribuinte para as emissões de gases do efeito estufa (GEE) e para o uso de recursos hídricos na produção cafeeira nacional. Considerando a relevância dessa região, especialmente do estado de Minas Gerais, torna-se essencial quantificar o acúmulo de carbono em diferentes sistemas de manejo, a fim de identificar estratégias capazes de reduzir as emissões e aumentar a sustentabilidade da cafeicultura.

Nesse contexto, os sistemas agroflorestais baseados na cafeicultura emergem como uma solução multifuncional e sustentável, integrando a mitigação dos gases de efeito estufa à adaptação climática. Segundo Awazi (2025), a transição para modelos consorciados permite não apenas o sequestro de carbono na biomassa arbórea e no solo, mas também a provisão de serviços ecossistêmicos vitais, como o controle da erosão e a ciclagem de nutrientes. Essa perspectiva reforça que a adoção de sistemas diversificados, ao criar microclimas resilientes, reduz a vulnerabilidade dos produtores e transforma a cafeicultura em uma ferramenta estratégica para a estabilidade ambiental e econômica frente às incertezas do aquecimento global.

2.3 Manejos de plantas espontâneas na lavoura cafeeira

O café é uma cultura perene cultivada em espaçamentos maiores, o que pode demandar um controle de plantas espontâneas em vários períodos do ano, desde a implantação da lavoura. Os períodos mais quentes e com maior precipitação são aqueles mais exigente no controle de plantas espontâneas, podendo esse ser feito com o uso de grades e enxadas ou aplicação de produtos químicos, como herbicidas de pré- emergência ou pós- emergência, na linha e/ou entrelinha do plantio.

O uso de herbicidas nas lavouras atua na pressão de seleção de biotipos de plantas que apresentam algum grau de resistência, assim, o uso contínuo de um mesmo produto químico pode aumentar a resistência de planta a um ponto ao qual o produto se torna ineficiente (SANTOS et. al., 2022). Entre as principais plantas resistentes encontra-se a buva (*Conyza*),

picão-preto (*Bidens pilosa*), capim colônia (*Panicum maximum*), braquiária (*Brachiaria* spp), trapoeraba (*Commelina benghalensis*) e capim pé-de-galinha (*Eleusine indica*) (COSTA–ALVO, 2019).

A classificação de herbicidas pode ser feita quanto à época de aplicação e quanto à seletividade do princípio ativo. Quanto a primeira, tem-se os herbicidas de pré-plantio incorporado, pré-plantio, pré-emergente, pré-emergente inicial, pós-emergente e de dessecação. Quanto à seletividade, podem ser seletivos às espécies e não seletivos (COSTA–ALVO, 2019).

Os herbicidas de pós-emergência são os que mais favorecem essa pressão de seleção nas plantas, logo, os herbicidas pré-emergência atuam como boa alternativa pois são aplicados antes mesmo do surgimento das plantas associadas à lavoura cafeeira e que possuem longo efeito residual, reduzindo o uso de máquinas nas áreas, contribuindo na redução da pegada de carbono.

Os herbicidas apresentam diferentes mecanismos de ação que afetam a fotossíntese e respiração das plantas. A aplicação dos pré-emergentes exige um maior entendimento da área e a dinâmica do ambiente, pois sua eficiência depende da estrutura, pH e matéria orgânica do solo, além das características intrínsecas ao herbicida, como a solubilidade e período residual.

Além do controle químico, o manejo mecânico por meio do uso de roçadeira e trincha é amplamente adotado na cafeicultura, especialmente na entrelinha, por permitir o controle das plantas espontâneas sem eliminação total da cobertura vegetal. A roçadeira promove o corte da parte aérea das plantas, mantendo os resíduos sobre o solo, enquanto a trincha, por sua vez, realiza a fragmentação mais intensa desse material, favorecendo a formação de uma cobertura uniforme (OLIVEIRA et al., 2024)..

Os resíduos vegetais resultantes de manejos mecânicos atuam como proteção física do solo, reduzindo a erosão, a perda de umidade e as oscilações térmicas, além de contribuírem para o aporte de matéria orgânica e ciclagem de nutrientes. Adicionalmente, esse tipo de manejo pode diminuir a dependência de herbicidas e reduzir a pressão de seleção de plantas resistentes, ao mesmo tempo em que mantém os benefícios ecológicos associados à presença de cobertura vegetal na lavoura (OLIVEIRA et al., 2024).

2.4 Cafeicultura consorciada e sistema agroflorestal

Em cultivos de cafeeiros, os produtores já presenciam padrões climáticos extremos e imprevisíveis, como a restrição hídrica e as geadas, causando a necessidade de adaptação a fim de reduzir os impactos negativos de mudanças climáticas, e, ainda se beneficiar de novas oportunidades. Dentro desse contexto, o uso de sistemas agrícolas que favorecem a conservação do solo, da água, dos nutrientes e da diversidade de produção, representa uma alternativa para produtores que visam menores custos e uma produção sustentável.

O uso de sistemas agroflorestais para o cultivo do café pode transformar uma área cafeeira de emissora de carbono para sequestradora de carbono (SALGADO VERAMENDI et al., 2025). Alguns resultados mostram que o cultivo de café sob condições de sombra pode reduzir em até 56% as emissões líquidas de carbono do sistema (HERGOUALC'H et al., 2012; GOMES et. al., 2020). Além disso, essa estratégia de mitigação promoveu aumentos no estoque de carbono de até 32 t CO₂-eq ha⁻¹ (SOTO-PINTO et al., 2010; HERGOUALC'H et al., 2012) e aumentou o estoque de carbono no sistema cafeeiro de forma geral (ANDRADE & ZAPATA 2019; LUGO-PÉREZ et al., 2023; AWAZI, 2025).

Em sistemas agroflorestais, a biomassa verde das plantas de café geralmente não é considerada nos cálculos de estoque de carbono, devido a perda de ramos e folhas em um curto período. No entanto, estimativas espaciais indicam que sua quantificação pode reduzir 92% das emissões líquidas de carbono do sistema, revelando o potencial de mitigação da própria plantação de café (MARTINS et al., 2018).

Um estudo usando modelos climáticos indica que grandes mudanças em áreas adequadas para a produção de café podem ocorrer dentro de três décadas, levando potencialmente a conflitos de terra para produção de café e conservação da natureza. No entanto, a adoção de sistemas agroflorestais com 50% de sombreamento pode reduzir as temperaturas médias e manter 75% da área apta para a produção de café em 2050, especialmente entre 600 e 800 m de altitude (GOMES et. al., 2020).

Outra estratégia de mitigação de mudanças climáticas são os cultivos consorciados que podem ser feitos com espécies de gramíneas, leguminosas e até mesmo, espécies de plantas emergentes do campo de cultivo. Esse sistema trabalha na cobertura do solo, visando sua proteção contra a erosão, bem como a melhoria da fertilidade do solo, com possibilidades de reduzir o consumo de fertilizantes minerais e dispensar tratos culturais como o uso de grade, enxadas e herbicidas (CHAVES 2005; DE OLIVEIRA et. al., 2020).

Os cultivos consorciados evitam perdas de nutrientes e possibilitam um ambiente propício para o reaproveitamento de nutrientes. Essa prática também contribui para o controle de plantas espontâneas, além da conservação do ecossistema. Dessa forma pode-se reduzir o uso de fertilizantes minerais, que são responsáveis pela liberação de CO₂ equivalente para a atmosfera, contribuindo fortemente na pegada de carbono da cafeicultura e, embora o clima mude, as reservas de carbono nos sistemas agroflorestais de café se mantêm relativamente estáveis ao longo de 50 anos (RUIZ-GARCÍA et. al., 2021).

Estudos apostam a importância das plantas consorciadas no enriquecimento de matéria orgânica no solo que pode representar cerca de 80% da capacidade de troca catiônica, o que contribui fortemente na manutenção de nutrientes e, no sequestro de carbono atmosférico (CRISTÓBAL-ACEVEDO et. al., 2019). Assim, considerando que o solo é o principal depósito de carbono na natureza é essencial a adoção de práticas que aumentem esse potencial de armazenamento de carbono (MANFRE et al., 2019).

SEGUNDA PARTE

Artigo 1 - Elaborado conforme a norma NBR 6022	
Título do artigo:	Acúmulo de Carbono em Lavoura Cafeeira Consorciada com Espécies Florestais
Autores:	Indira Pereira de Oliveira, Regis Pereira Venturin, André Dominghetti Ferreira, Vinícius Teixeira Andrade, Andreisa Fabri Lima, Leônidas Canuto Santos, Vânia Aparecida Silva, Vladimir Eliodoro Costa, Gladyston Rodrigues Carvalho



ARTIGO 1 - ACÚMULO DE CARBONO EM LAVOURA CAFEEIRA CONSORCIADA COM ESPÉCIES FLORESTAIS

CARBON ACCUMULATION IN COFFEE PLANTATIONS ASSOCIATED WITH FOREST SPECIES¹

Indira Pereira de Oliveira

<https://orcid.org/0000-0002-0105-505X>

Regis Pereira Venturin

<https://orcid.org/0000-0002-2309-4367>

André Dominghetti Ferreira

<https://orcid.org/0000-0002-6512-4923>

Vinícius Teixeira Andrade

<https://orcid.org/0000-0002-0011-2788>

Andreisa Fabri Lima

<https://orcid.org/0000-0001-6537-0756>

Leônidas Canuto Santos

<https://orcid.org/0000-0002-0385-4736>

Vânia Aparecida Silva

<https://orcid.org/0000-0001-6640-3644>

Vladimir Eliodoro Costa

<http://orcid.org/0000-0003-3889-7514>

Gladyston Rodrigues Carvalho

<https://orcid.org/0000-0002-4466-674X>

Resumo: A cafeicultura em sistemas agroflorestais (SAFs) surge como alternativa para converter agroecossistemas em sumidouros de carbono (C). Este estudo objetivou quantificar o estoque de C nos compartimentos planta, solo e serapilheira em consórcios de café com mogno-africano (*Khaya grandifoliola*), teca (*Tectona grandis*) e acrocarpus (*Acrocarpus fraxinifolius*), comparando-os à monocultura e mata nativa em propriedade cafeeira no município de Santo Antônio do Amparo-MG. Para tanto, utilizou-se o método destrutivo para quantificação da biomassa dos cafeeiros (particionados em ramos, folhas e raízes) e equações alométricas baseadas no DAP e altura para as espécies arbóreas. O estoque de C no solo foi avaliado até 60 cm de profundidade através de amostragem em camadas (0-10, 10-30 e 30-60 cm), enquanto a serapilheira foi coletada semestralmente para captar a sazonalidade do aporte. Aos 12 anos de implantação, observou-se que a escolha da espécie arbórea dita a dinâmica de alocação de C. O consórcio com Mogno (T1) foi o mais eficiente no acúmulo de carbono no cafeeiro (33,31 t C ha⁻¹ na planta), sugerindo um microclima favorável. Por sua vez, o Acrocarpus (T3) atuou como um dreno de C eficiente no componente arbóreo (53,48 t C ha⁻¹), mas induziu competição interespecífica, reduzindo o estoque no cafeeiro. No solo, o Acrocarpus promoveu o maior sequestro subsuperficial (30-60 cm), com 54,4 t C ha⁻¹. Conclui-se que o Mogno aumenta o acúmulo de biomassa aérea do cafeeiro, enquanto o

¹ Artigo científico apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, área de concentração em Cafeicultura.

Acrocarpus potencializa o sequestro total de C e em profundidade no solo, sendo ambas estratégias eficazes para aumento do estoque de carbono na lavoura.

Palavras-chave: Estoque de Carbono; Sistemas Agroflorestais; *Coffea arabica*; Serapilheira.

Abstract: Coffee cultivation in agroforestry systems (AFSs) emerges as an alternative to convert agroecosystems into carbon (C) sinks. This study aimed to quantify the C stock in the plant, soil, and litter compartments in coffee intercropping systems with African mahogany (*Khaya grandifoliola*), teak (*Tectona grandis*), and acrocarpus (*Acrocarpus fraxinifolius*), comparing them to monoculture and native forest on a coffee farm in the municipality of Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais (MG), Brazil. To achieve this, the destructive method was used to quantify coffee tree biomass (partitioned into branches, leaves, and roots), and allometric equations based on DBH (diameter at breast height) and height were applied for the tree species. Soil C stock was evaluated down to a depth of 60 cm through layered sampling (0–10, 10–30, and 30–60 cm), while litter was collected semi-annually to capture the seasonality of the input. At 12 years post-establishment, it was observed that the choice of tree species dictates the C allocation dynamics. Intercropping with Mahogany (T1) was the most efficient in accumulating carbon in the coffee tree (33.31 t C ha⁻¹ in the plant), suggesting a favorable microclimate. Conversely, Acrocarpus (T3) acted as an efficient C sink in the tree component (53.48 t C ha⁻¹), but induced interspecific competition, reducing the stock in the coffee tree. In the soil, Acrocarpus promoted the highest subsurface sequestration (30–60 cm), with 54.4 t C ha⁻¹. It is concluded that Mahogany increases the aboveground biomass accumulation of the coffee tree, while Acrocarpus enhances total and deep-soil C sequestration, both being effective strategies for increasing carbon stocks in coffee crops.

Keywords: Carbon stocks; Agroforestry systems; *Coffea arabica*; Litter.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais intensificaram a preocupação com as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o manejo sustentável dos ecossistemas terrestres. O dióxido de carbono (CO₂) é o principal GEE, e sua concentração atmosférica é diretamente influenciada pelo ciclo biogeoquímico do carbono e pelas práticas de uso da terra, que podem transformar sistemas agrícolas em fontes ou sumidouros deste elemento (IPCC, 2023).

O cafeeiro (*Coffea arabica* L.) destaca-se no Brasil por sua importância econômica e social. Sendo uma espécie perene, possui elevado potencial de acúmulo de carbono na biomassa e no solo (TAVARES et al., 2020). Entretanto, sistemas convencionais a pleno sol, caracterizados pelo revolvimento do solo e baixa diversidade, podem reduzir os estoques de carbono e aumentar a vulnerabilidade à degradação física e erosão (GUIMARÃES et al., 2019; AMORIM et al., 2026). Essa fragilidade é crítica no compartimento edáfico, que armazena até três vezes mais carbono que a atmosfera, sendo altamente sensível a mudanças de manejo. A manutenção desses estoques depende do aporte de resíduos vegetais, da cobertura do solo e da estabilidade da matéria orgânica, complementados pela biomassa vegetal e serapilheira (LAL, 2019).

Nesse contexto, os sistemas agroflorestais (SAFs) de café emergem como uma estratégia eficaz para a provisão de serviços ecossistêmicos e sequestro de carbono (AWAZI, 2025). A inclusão de árvores eleva os estoques de biomassa aérea e de carbono no solo comparado ao cultivo a pleno sol, devido à maior complexidade estrutural, ciclagem de nutrientes e aporte contínuo de raízes (LUGO-PÉREZ et al., 2023; MOREIRA et al., 2023). Estudos recentes corroboram ganhos expressivos no estoque total de C (biomassa + solo + serapilheira) em cultivos arborizados, embora a variabilidade dependa da composição de espécies e manejo (SALGADO VERAMENDI et al., 2025; TINOCO et al., 2026).

Os mecanismos de incremento nesses sistemas incluem o acúmulo de biomassa lenhosa, a maior entrada de serapilheira, favorecendo a estabilização do carbono superficial e a heterogeneidade radicular, que melhora a incorporação de C em camadas subsuperficiais (PARAJULI et al., 2024). Além do sequestro de carbono, tais mudanças promovem biodiversidade, proteção do solo e regulação microclimática (LUGO-PÉREZ et al., 2023). Na cafeicultura brasileira, espécies como o mogno-africano (*Khaya grandifoliola*), a teca

(*Tectona grandis*) e o acrocarpus (*Acrocarpus fraxinifolius*) destacam-se pelo rápido crescimento, conciliando a produção de café e madeira com benefícios ambientais.

Apesar dos avanços, persistem lacunas sobre a quantificação do carbono em consórcios sob condições edafoclimáticas específicas, como as de Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais. Compreender essa dinâmica local é essencial para validar esses sistemas como sumidouros de carbono. Assim, o presente trabalho propõe quantificar o estoque de carbono nos compartimentos da planta de café (parte aérea e radicular), das espécies florestais, no solo e na serapilheira em cultivos cafeeiros consorciados com mogno-africano, teca e acrocarpus, visando orientar manejos que maximizem o estoque de carbono.

2 METODOLOGIA

Caracterização da área do experimento

O estudo foi realizado na propriedade do grupo Neumann Kaffee Gruppe (NKG) localizada no município de Santo Antônio do Amparo-MG, cujas coordenadas são 20° 54' 58.1" S de latitude e 44° 51' 13.7" W de longitude. Segundo a classificação de Köppen, a região apresenta clima Cwa, subtropical úmido, com verões quentes e úmidos e invernos frios e secos (VOLPATO et al., 2019), com altitude de 1089 m, temperatura média de 19,8 °C e precipitação 1670 mm ano⁻¹ (SILVEIRA et al., 2016).

Tabela 1. Caracterização químicas do latossolo vermelho da área do experimento.

Latossolo vermelho												
pH	K	P	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	m
mg dm ⁻³					cmol _c dm ⁻³				%			
5.59	73.1	8.7	1.33	3.42	1.08	0.18	5.38	4.68	4.87	10.06	47.7	6.46
MO	CO	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S					
%		mg dm ⁻³										
3.13	1.18	4.1	45.33	8.72	3.19	0.78	39.28					

pH em água: potencial hidrogeniônico em água; Al: alumínio – extrator: KCl 1 mol L⁻¹; H + Al: acidez potencial; Ca: cálcio; Mg: magnésio; K: potássio; P: fósforo; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; S: enxofre – extrator: fosfato monocalcico em ácido acético; MO: matéria orgânica – oxidação: Na₂Cr₂O₇ 4N + H₂SO₄ 10N; SB: soma de bases trocáveis; t: capacidade de troca catiônica efetiva (CTC); T: capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: saturação por bases; m: índice de saturação por alumínio. P, K, Fe, Zn, Mn e Cu – extrator: Mehlich-1; H + Al – extrator: SMP; Abaixo do limite de detecção (0,08 mg dm⁻³).

O experimento foi instalado em 2012, constituído por sistemas agroflorestais de café arábica, cultivar Catuaí vermelho IAC 99, sob o espaçamento 3,40 m x 0,65 m, consorciado

com 3 diferentes espécies florestais no espaçamento $13,6 \times 9$ m e $13,6 \times 18$ m na mesma linha do cafeeiro, além da área de monocultura e área de mata secundária adjacente à área do experimento.

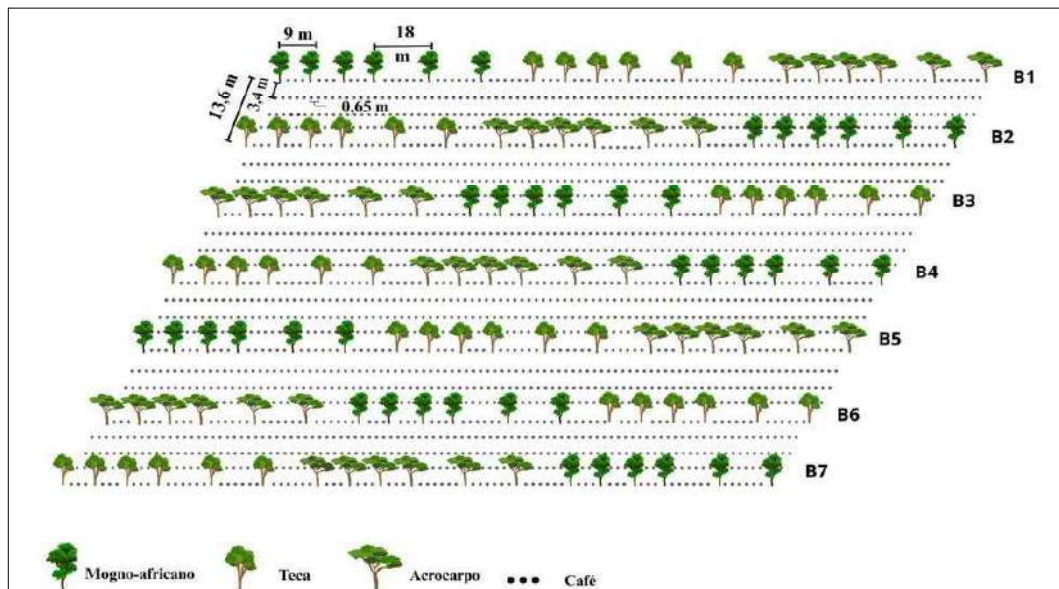


Figura 1. Layout do experimento de sistema agroflorestal, localizado no município de Santo Antonio do Amparo – MG. Fonte: AMUDA, 2025.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados com três repetições (foram estudados apenas bloco 1, 2 e 3) e cinco tratamentos: tratamento 1: café consorciado com Mogno africano (*khaya grandifoliola*); tratamento 2: café consorciado com Teca (*Tectona grandis*), tratamento 3: café consorciado com Acrocarpus (*Acrocarpus fraxinifolius*), tratamento 4: monocultura e tratamento 5: mata. O estoque de carbono nos compartimentos solo e serapilheira dos sistemas cultivados (T1 a T4) será comparado entre si, tendo a monocultura (T4) como controle de manejo e a área de mata secundária (T5) como referência de ecossistema.

Amostragem

A biomassa da serapilheira acumulada foi quantificada em todos os sistemas de cultivo seguindo a metodologia de Tavares et al. (2020), utilizando-se um gabarito metálico de $0,50 \times 0,50$ m ($0,25$ m²). As amostragens foram realizadas semestralmente durante o ano de 2023, abrangendo os períodos seco e chuvoso de cada ciclo para caracterizar a estacionalidade do aporte de resíduos. Em cada parcela, foram coletadas duas amostras

representativas (uma na linha e outra na entrelinha de cultivo), totalizando seis unidades amostrais por sistema em cada época de coleta.

O material coletado foi pesado em balança de precisão (0,01 g) para obtenção da massa fresca e, em seguida, acondicionado em sacos de papel. As amostras foram submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até atingirem massa constante, permitindo a estimativa do rendimento de massa seca ($t\ ha^{-1}$). Após a secagem, o material foi processado em moinho tipo Willey e armazenado em recipientes plásticos herméticos para a posterior determinação dos teores de carbono orgânico.

O teor de Carbono Orgânico Total (COT) da serapilheira foi determinado por combustão a seco em Analisador Elementar. As amostras moídas foram submetidas à oxidação completa em alta temperatura, seguindo os protocolos laboratoriais descritos em Teixeira et al. (2017). A partir dos teores percentuais obtidos e da biomassa seca da amostra, calculou-se o estoque de carbono no compartimento, expresso em toneladas por ha.

A quantificação da biomassa das plantas de café foi realizada pelo método destrutivo, conforme preconizado por Segura et al. (2006) para estudos de partição de biomassa em cafeeiros. Foram coletadas duas plantas representativas por unidade experimental, sendo as raízes extraídas completamente do solo para análise do sistema radicular de apenas uma planta por tratamento.

As plantas foram separadas em cinco compartimentos (órgão da planta): ramos ortotrópicos, ramos plagiotrópicos, folhas, raízes finas e raízes grossas. Após a pesagem da massa fresca total de cada órgão em campo, subamostras foram retiradas e transportadas ao laboratório para determinação da matéria seca. Seguindo a metodologia de Tavares et al. (2020), o material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até atingir massa constante (aproximadamente 72 horas). O teor de Carbono Orgânico Total (COT) foi determinado pela mesma metodologia de serapilheira Teixeira et al. (2017).

A biomassa para cada órgão da planta (ramo ortotrópico, ramo plagiotrópicos, folhas, raízes finas e raízes grossas) e o estoque de carbono por hectare foram calculados com base na área ocupada por 5000 pés de café dentro de 1 hectare, utilizando-se as seguintes equações:

$$Biomassa(g): B_{\text{órgão da planta}} = \frac{PF \times PSA}{PFA} \text{ eq.1}$$

Onde: PF = peso fresco total; PSA = peso seco da amostra; PFA = peso fresco da amostra.

O estoque de carbono nos compartimentos foi obtido a partir da biomassa seca, utilizando o teor de carbono determinado em laboratório para o material vegetal, conforme a Equação 2 (eq.2):

$$Estoque \text{ de Carbono por Órgão (kg): } C_{\text{órgão}} = B_{\text{órgão}} \times \frac{C\%}{100} \text{ eq.2}$$

em que $C_{\text{órgão}}$ corresponde ao carbono presente no órgão da planta em kg (ramos, folhas ou raízes) e $C\%$ é o teor de carbono do tecido vegetal (%). Finalmente foi feita a extrapolação da quantidade de carbono para a área de 1 hectare pela equação 3 (eq.3), onde o Carbono total (C_{total}) = carbono do compartimento $\times$ 5000 plantas / 1000, para transformação de Kg para toneladas por hectare:

$$Extrapolação \text{ para Área (ha}^{-1}\text{): } C_{\text{total}} = \frac{C_{\text{órgão}} \times 5000}{1000} \text{ eq.3}$$

Para o sistema radicular, utilizou-se o método volumétrico para estimar a densidade de biomassa (kg m^{-3}) em buracos de volume conhecido ($V = \text{Largura} \times \text{Comprimento} \times \text{profundidade}$). O acúmulo foi extrapolado para a área de 5.888 m^2 dentro de um hectare (10.000 m^2), considerando que as raízes das 5000 plantas de café ocupam essa área em um hectare e, a profundidade de amostragem no buraco:

$$Acúmulo C_{\text{radicular}} = \left(\frac{M_{\text{raiz}}}{V} \right) \times h \times 5888 \times COT_{\text{raiz}} \text{ eq.4}$$

Onde M_{raiz} é a massa seca de raízes (kg); V é o volume do buraco (m^3); h é a profundidade (m); e COT_{raiz} é a fração de carbono nas raízes. O carbono total da planta foi obtido pelo somatório dos compartimentos aéreo e radicular, seguindo a lógica alométrica de Segura et al. (2006) e aplicados recentemente em sistemas cafeeiros (EHRENBERGEROVA et al. 2016 e TAVARES et al. 2020).

A quantificação da biomassa das espécies arbóreas consorciadas ao café foi realizada a partir de medições dendrométricas e do uso de equações alométricas amplamente recomendadas para estimativas em florestas tropicais. Para cada árvore, mediu-se o diâmetro à altura do peito (DAP, a 1,30 m do solo) utilizando fita diamétrica, bem como a altura total (h). A densidade básica da madeira (ρ) foi atribuída conforme valores disponíveis em bases de dados regionais realizados na fazenda em estudo, previamente obtidos nos estudos de dendrometria das árvores (AMUDA, 2025).

A partir dessas variáveis, a biomassa aérea acima do solo (AGB) foi estimada utilizando a equação desenvolvida por Chave et al. (2014), amplamente reconhecida por sua robustez para espécies tropicais. A biomassa radicular (biomassa abaixo do solo: BGB) foi estimada a partir da relação alométrica com a biomassa aérea (AGB), utilizando-se o fator de partição médio de 0,22 recomendado pelo IPCC (2006) para florestas tropicais plantadas.

Após a determinação da biomassa total individual (AGB + BGB), os valores foram convertidos em estoque de carbono aplicando-se o fator de conversão de 0,50 IPCC (2006). Para converter os dados individuais em valores por hectare, multiplicou-se o carbono acumulado por árvore pelo número total de plantas na área.

As amostras de solo deformadas foram realizadas no primeiro semestre de 2023, nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm, contemplando as posições de linha e entrelinha do cafeeiro. Amostras indeformadas foram coletadas com anéis volumétricos na entrelinha para a determinação da densidade aparente do solo (Ds) nas mesmas profundidades. As amostras de solo coletadas nessas três profundidades, foram secas ao ar, peneiradas (2 mm) e analisadas quanto às suas propriedades químicas e físicas.

O teor de Carbono Orgânico Total (COT) no solo foi determinado via oxidação úmida com dicromato de potássio em meio ácido, seguido de titulação com sulfato ferroso amoniacal, conforme a metodologia descrita no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (TEIXEIRA et al., 2017).

O estoque de carbono no solo (ECS: $t\ ha^{-1}$) para cada camada foi calculado com base nos teores de carbono orgânico total (COT: %), na densidade aparente do solo (Ds: $g\ cm^{-3}$) e na espessura da camada amostrada (e: m), conforme a expressão:

$$ECS = COT \times Ds \times e \times 100 \text{ eq. 5}$$

Os estoques de carbono do solo (ECS) foram estimados considerando-se que a densidade do solo (Ds) e os teores de carbono orgânico total (COT) não diferiram entre a linha e a entrelinha do cafeeiro, conforme relatado por Cogo et al. (2013) para cafezais da mesma região.

Análise estatística

Os dados foram inicialmente avaliados quanto aos pressupostos de normalidade dos resíduos, utilizando o teste de Shapiro–Wilk, e homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. Quando os pressupostos não foram atendidos, aplicou-se a transformação logarítmica em base 10 [$\log_{10}$], procedimento comumente recomendado para variáveis biométricas de distribuição assimétrica.

Em seguida, os dados foram analisados por meio de análise de variância (ANOVA) em delineamento em blocos casualizados. Quando detectado efeito significativo de tratamentos ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Todas as análises e os gráficos foram realizadas no software R versão 4.3.0 (R Development Core Team, 2023).

3 RESULTADOS

As análises de serapilheira foram realizadas no primeiro e no segundo semestre de 2023 (Tabela 2). A avaliação do estoque de carbono da serapilheira coletada na linha e na entrelinha do cafeeiro demonstrou ausência de diferenças estatísticas entre os tratamentos em ambos os períodos avaliados ($p > 0,05$).

No primeiro semestre, os estoques de carbono na linha variaram de 5,57 a 8,57 t C ha⁻¹, enquanto na entrelinha os valores oscilaram entre 4,67 e 7,74 t C ha⁻¹. Já no segundo semestre, observou-se redução nos estoques de carbono em todos os tratamentos, com valores variando de 3,07 a 3,88 t C ha⁻¹ na linha e de 1,58 a 5,04 t C ha⁻¹ na entrelinha.

Embora alguns tratamentos tenham apresentado maiores valores numéricos em determinados períodos, como o consórcio Café + Acrocarpus (T3) e Café + Teca (T2), essas variações não foram suficientes para promover diferenças significativas no estoque de carbono da serapilheira entre os sistemas avaliados.

Tabela 2. Valores médios do estoque de carbono (t C ha^{-1}) na serapilheira em cada tratamento na linha e entrelinha coletados no primeiro e no segundo semestre. T1- café + mogno; T2- café + teca; T3- café + acrocarpus e T4- café solteiro.

Período	local	T1	T2	T3	T4	Valor-p
1º	Linha	8,03	5,82	8,57	5,57	ns
Semestre	Entrelinh	4,67	7,74	7,33	6,64	ns
	a					
2º	Linha	3,31	3,86	3,88	3,07	ns
Semestre	Entrelinh	3,02	2,31	5,04	1,58	ns
	a					

ns: não significativo ($p > 0,05$) pelo teste F da ANOVA.

O estoque de carbono nos ramos ortotrópicos do cafeeiro (figura 2) foi influenciado pelos sistemas de cultivo. O consórcio Café + mogno africano (T1) apresentou o maior acúmulo ($9,65 \text{ t C ha}^{-1}$), sendo superior à monocultura (T4: $5,59 \text{ t C ha}^{-1}$) e ao consórcio Café + acrocarpus (T3: $4,17 \text{ t C ha}^{-1}$). O tratamento Café + teca (T2) apresentou desempenho intermediário ($6,55 \text{ t C ha}^{-1}$), sem diferir dos demais, configurando uma transição entre os sistemas de maior e menor estoque (figura 2). A ausência de diferença entre T4 e T3 indica que, apesar das variações numéricas, o padrão de acúmulo de carbono nesses dois manejos foi semelhante.

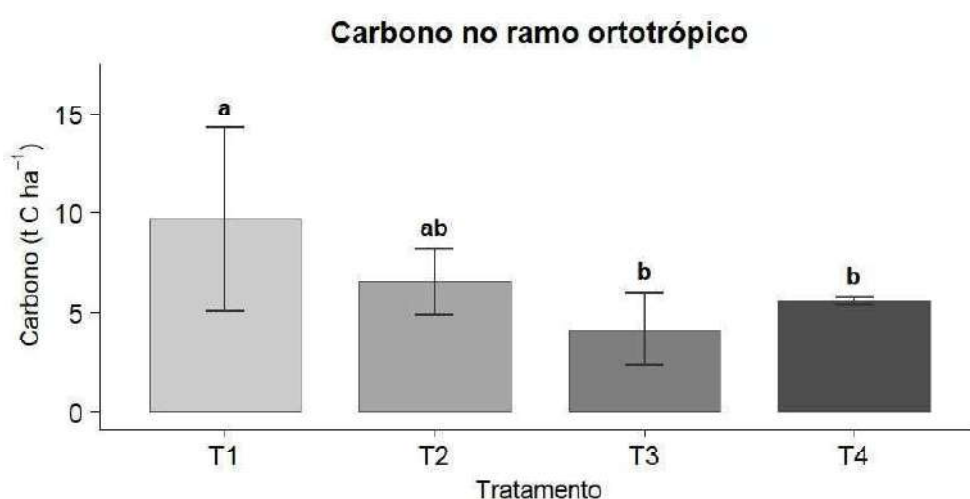


Figura 2. Carbono (t C ha^{-1}) nos ramos ortotrópicos de cafeeiros. Tratamentos 1: café + mogno africano, tratamento 2: café + teca, tratamento 3: café + Acrocarpus, tratamento 4: monocultura. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Quanto ao acúmulo de carbono nos ramos plagiotrópicos dos cafeeiros (figura 3), a análise evidenciou a formação de três grupos distintos. Os consórcios Café + mogno africano (T1: 3,50 t C ha⁻¹) e Café + teca (T2: 3,35 t C ha⁻¹) apresentaram os maiores estoques, sendo superiores ao observado no consórcio Café + acrocarpus (T3: 2,52 t C ha⁻¹). A monocultura (T4) apresentou valor intermediário (3,10 t C ha⁻¹), sem diferir significativamente dos demais tratamentos. Esses resultados sugerem que as interações ecológicas estabelecidas nos sistemas com mogno e teca favorecem o acúmulo de carbono nesse compartimento em comparação ao sistema com acrocarpus (figura 3), sistema no qual as plantas de café já se encontram sobre sombreamento excessivo e assim estão alterando a arquitetura de plantas para adaptação a este ambiente.

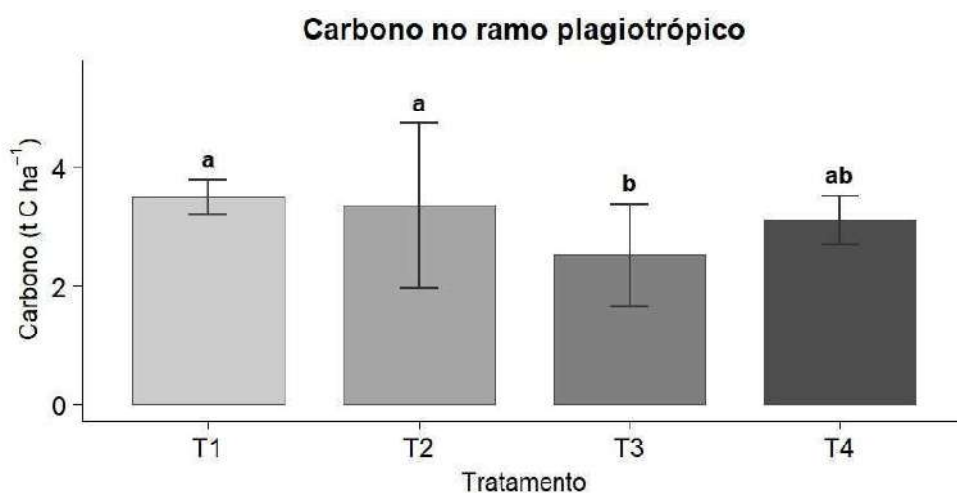


Figura 3. Carbono (t/ha) nos ramos plagiotrópicos de cafeeiros. Tratamentos 1: café + mogno africano, tratamento 2: café + teca, tratamento 3: café + Acrocarpus, tratamento 4: monocultura. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Em relação ao estoque de carbono nas folhas de café (figura 4), o tratamento Café + mogno africano (T1) obteve o maior valor médio (2,24 t C ha⁻¹) sendo estatisticamente superior ao Café + teca (T2: 1,35 t C ha⁻¹). Os tratamentos Café + acrocarpus (T3: 1,77 t C ha⁻¹) e a monocultura (T4: 1,78 t C ha⁻¹) apresentaram resultados intermediários, não diferindo estatisticamente dos demais sistemas (figura 4).

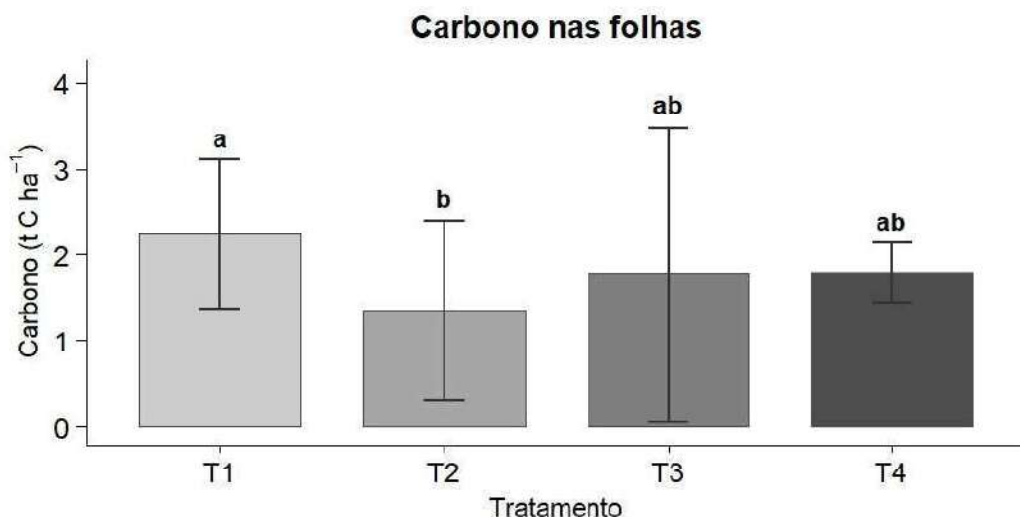


Figura 4. Carbono (t C ha^{-1}) nas folhas de cafeeiros. Tratamentos 1: café + mogno africano, tratamento 2: café + teca, tratamento 3: café + Acrocarpus, tratamento 4: monocultura. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A análise estatística do estoque de carbono nas raízes finas e raízes grossas, apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos (tabela 3). O acúmulo de carbono nas raízes finas apresentou variação entre os tratamentos, com maiores valores observados em T1 ($6,08 \text{ t ha}^{-1}$), seguido por T2 ($4,77 \text{ t ha}^{-1}$), T4 ($1,95 \text{ t ha}^{-1}$) e T3 ($1,13 \text{ t ha}^{-1}$). Para as raízes grossas, observou-se padrão distinto, com maior acúmulo em T4 ($4,92 \text{ t ha}^{-1}$), seguido por T1 ($4,48 \text{ t ha}^{-1}$), T2 ($4,12 \text{ t ha}^{-1}$) e T3 ($3,27 \text{ t ha}^{-1}$).

Tabela 3. Carbono (t ha^{-1}) nas raízes fina e raízes grossas dos cafeeiros para cada tratamento.

Tratamento	Raízes finas	Raízes grossas
T1 – Café + mogno africano	6,08a	4,48b
T2 – Café + teca	4,77b	4,12c
T3 – Café + acrocarpus	1,13d	3,27d
T4 – Monocultura	1,95c	4,92a

T1: café + mogno africano; T2: café + teca; T3: café + acrocarpus; T4: monocultura. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). ns: não significativo.

O acúmulo total de carbono nas raízes (raízes finas + raízes grossas) variou entre os tratamentos (figura 5), com maiores valores observados no consórcio café + mogno africano (T1) ($10,55 \text{ t ha}^{-1}$), seguido por café + teca (T2) ($8,90 \text{ t ha}^{-1}$), monocultura (T4) ($6,88 \text{ t ha}^{-1}$) e café + acrocarpus (T3) ($4,40 \text{ t ha}^{-1}$).

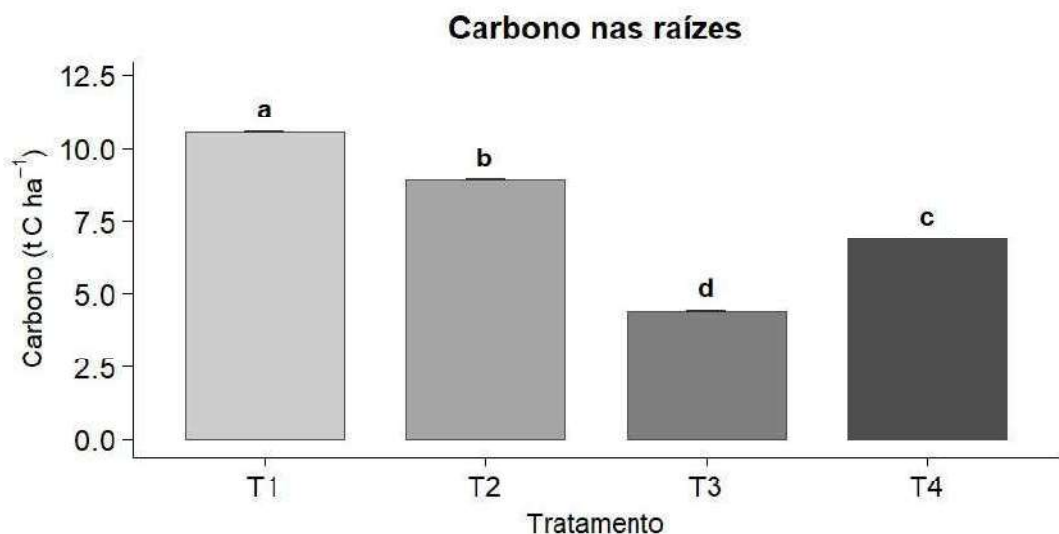


Figura 5. Carbono (t ha^{-1}) no total das raízes de cafeeiros (raízes finas+ raízes grossas). Tratamentos 1: café + mogno africano, tratamento 2: café + teca, tratamento 3: café + Acrocarpus, tratamento 4: monocultura. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

O estoque total de carbono nas plantas de café (somatório dos ramos, folhas e raízes- figura 6) apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os sistemas de cultivo. O consórcio Café + mogno africano (T1) consolidou-se como o mais eficiente, com um acúmulo de $25,94 \pm 2,08 \text{ t C ha}^{-1}$, superando todos os demais tratamentos.

Na sequência, o consórcio Café + teca (T2: $26,36 \text{ t C ha}^{-1}$) e a monocultura (T4: $22,16 \text{ t C ha}^{-1}$) apresentaram valores intermediários, sem diferir estatisticamente entre si. Já o consórcio Café + acrocarpus (T3) registrou o menor estoque de carbono na planta ($12,86 \text{ t C ha}^{-1}$), diferindo significativamente dos demais sistemas avaliados (Figura 6).

De forma geral, os resultados indicam que o arranjo agroflorestal com mogno africano (T1) foi o mais eficiente em promover o acúmulo de carbono na planta inteira de café, enquanto o consórcio com teca (T2) apresentou desempenho intermediário. Em contraste, o consórcio com acrocarpus (T3) evidenciou um efeito competitivo mais intenso por luz, resultando em menor capacidade de estocagem de carbono pelo cafeeiro.

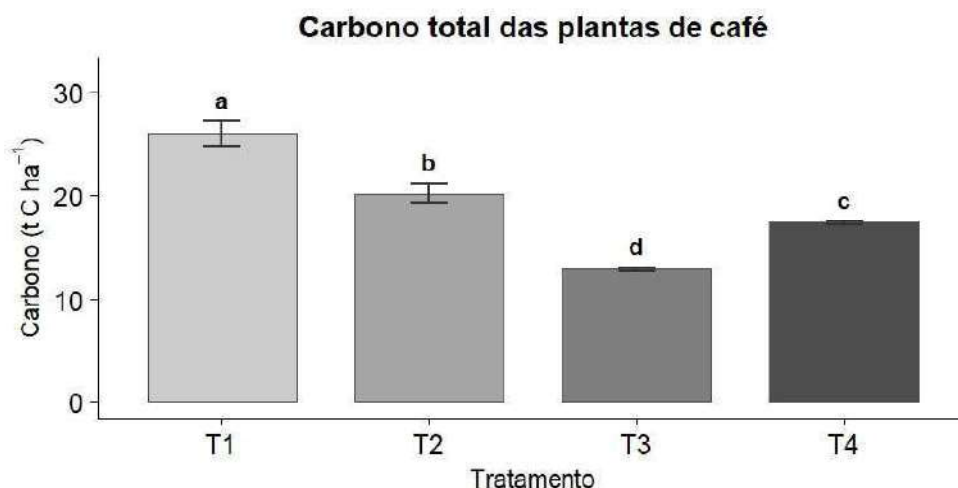


Figura 6. Carbono (t C ha⁻¹) nas plantas inteiras de café. Tratamentos 1: café + mogno africano, tratamento 2: café + teca, tratamento 3: café + Acrocarpus, tratamento 4: monocultura. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Quanto ao acúmulo de carbono nas espécies arbóreas (figura 7), o consórcio Café + Acrocarpus (T3) destacou-se com maior quantidade de carbono na parte aérea das árvores (46,86 t C ha⁻¹), superando amplamente os demais tratamentos. Por outro lado, os sistemas com Mogno (13,41 t C ha⁻¹) e Teca (11,40 t C ha⁻¹) não diferiram entre si, formando um grupo estatisticamente inferior. O estoque de carbono alocado nas raízes seguiu o mesmo padrão de distribuição. O Acrocarpus (T3) liderou o reservatório radicular com 10,31 t C ha⁻¹ nas raízes das árvores, enquanto os sistemas com Mogno (T1) e Teca (T2) foram semelhantes entre si, com estoques de 2,95 t C ha⁻¹ e 2,51 t C ha⁻¹, respectivamente.

Como o estoque de carbono reflete diretamente o padrão de acumulação de biomassa, o balanço total (parte aérea + raízes) confirmou a ampla superioridade do Acrocarpus (T3), que acumulou 57,17 t C ha⁻¹ (figura 7). Esse valor situa o sistema em um patamar de eficiência significativamente superior aos demais consórcios no que tange ao acúmulo de carbono no componente arbóreo. Já os sistemas Café + Mogno (T1: 16,35 t C ha⁻¹) e Café + Teca (T2: 13,91 t C ha⁻¹) apresentaram estoques de carbono estatisticamente semelhantes entre si, situando-se em um nível intermediário de acúmulo (figura 7). A discreta variação numérica inferior observada na Teca sugere que as características de crescimento da espécie ou possíveis interações competitivas no sistema podem ter limitado, de forma mais acentuada, a expansão da massa lenhosa e o consequente estoque de carbono em comparação ao mogno africano.

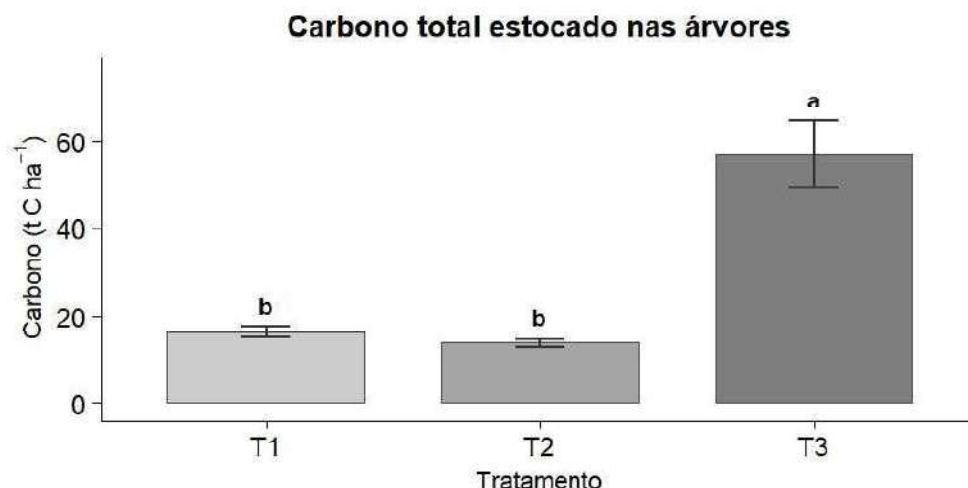


Figura 7. carbono total estocado nas árvores (t C ha⁻¹) em cada tratamento. Tratamentos 1: café + mogno africano, tratamento 2: café + teca, tratamento 3: café + Acrocarpus. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A análise do estoque de carbono no solo revelou efeitos significativos para tratamento, profundidade e para a interação entre esses fatores (figura 8), evidenciando que o impacto do sistema de cultivo é dependente da camada do solo considerada. Embora a vegetação nativa (T5) se mantenha como a principal referência de conservação, os sistemas cultivados apresentaram dinâmicas distintas de distribuição de carbono ao longo do perfil.

Na profundidade 0-10 cm (figura 8), os sistemas cultivados apresentaram estoques entre 25,2 e 30,3 t C ha⁻¹, valores estatisticamente semelhantes entre si e próximos ao solo de mata (33,7 t C ha⁻¹), sugerindo que a conversão superficial ainda não resultou em perdas severas de estoque de carbono.

Em 10-30 cm de profundidade, o solo de mata apresentou o maior estoque (65,6 t C ha⁻¹), como esperado. Entre os cultivos, o Café + Teca (T2) foi o mais eficiente (45,2 t C ha⁻¹), enquanto os demais sistemas e a monocultura apresentaram estoques significativamente menores (médias de 35,6 a 38,9 t C ha⁻¹). Na profundidade 30-60 cm, o consórcio Café + Acrocarpus (T3) se destacou entre os cultivos com 54,4 t C ha⁻¹, seguido pela monocultura (45,2 t C ha⁻¹). O sistema com Teca (T2), que liderava na camada intermediária, apresentou o menor valor nesta profundidade (41,7 t C ha⁻¹).

De forma geral, os resultados indicam que a magnitude do efeito do sistema de cultivo sobre o estoque de carbono é dependente da profundidade considerada. Os sistemas com maior complexidade estrutural e aporte de resíduos, como a mata nativa e os

consórcios com espécies arbóreas, apresentaram os maiores estoques de carbono, com diferenças mais expressivas nas camadas subsuperficiais: café + teca (T2) foi o melhor na camada intermediária e café + *Acrocarpus* (T3) foi o que mais se destacou na camada mais profunda.

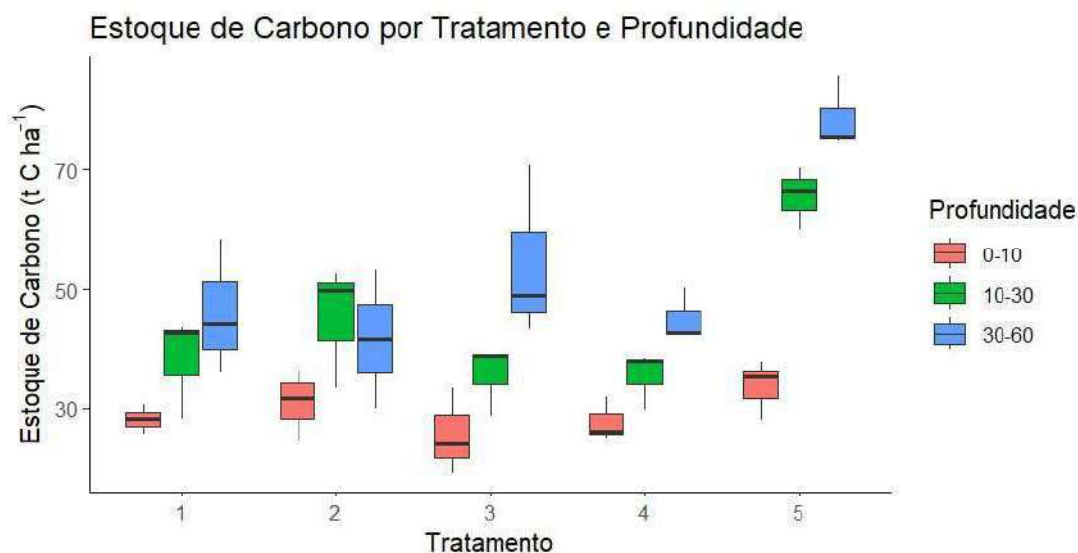


Figura 8. Estoque de carbono no solo (t C ha^{-1}) em diferentes tratamentos de manejo do café e profundidades (0–10, 10–30 e 30–60 cm). Tratamentos 1: café + mogno africano, tratamento 2: café + teca, tratamento 3: café + *Acrocarpus*, tratamento 4: monocultura, tratamento 5: mata. As caixas representam a variação interquartil, a linha central a mediana e as hastes os valores mínimo e máximo observados.

A análise do acúmulo total de carbono no sistema (serapilheira + solo + café + árvores) revelou uma superioridade dos sistemas consorciados/manejados (T1, T2 e T3) em relação ao sistema convencional (T4) (figura 9). O tratamento T3 apresentou o maior valor absoluto ($209,67 \text{ t ha}^{-1}$), seguido por T1 ($176,72 \text{ t ha}^{-1}$) e T2 ($175,06 \text{ t ha}^{-1}$), todos pertencentes ao grupo de maior performance estatística. Em contraste, o sistema T4 apresentou o menor estoque ($138,26 \text{ t ha}^{-1}$), evidenciando que a ausência de componentes arbóreos ou de sistemas conservacionistas pode reduzir a capacidade de estocagem de carbono do sistema cafeeiro em até 32% quando comparado ao sistema mais eficiente.

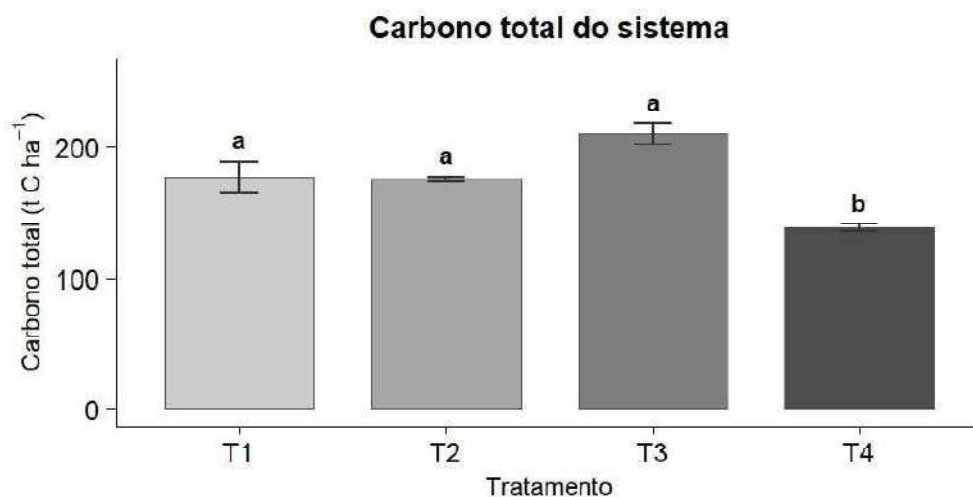


Figura 9. Carbono total estocado no sistema (t C ha⁻¹) em cada tratamento. Tratamentos 1: café + mogno africano, tratamento 2: café + teca, tratamento 3: café + Acrocarpus, tratamento 4: café em monocultura. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A produtividade do cafeeiro em 2023 não apresentou diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos (figura 10), embora tenha sido observada uma tendência de efeito do sistema de cultivo. Os valores médios variaram de 9,0 a 21,75 sacas ha⁻¹, com maior produtividade numérica observada no tratamento T4 e menor no T3.

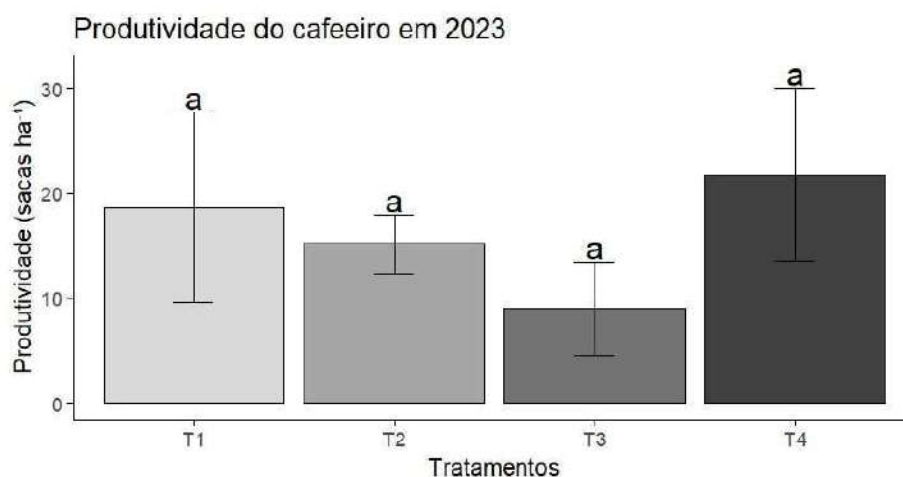


Figura 10. Produtividade dos cafeeiros em cada tratamento (sacas ha⁻¹). Tratamentos 1: café + mogno africano, tratamento 2: café + teca, tratamento 3: café + Acrocarpus, tratamento 4: café em monocultura. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

4 DISCUSSÃO

Estudos recentes em diferentes regiões produtoras do mundo, como na Indonésia, têm demonstrado o elevado potencial de mitigação climática de sistemas cafeeiros sob manejo agroflorestal (PRAMULYA et al., 2025; AWAZI, 2025), corroborando a necessidade de quantificações precisas desses estoques em biomas brasileiros.

Acúmulo de Carbono na Serapilheira

A ausência de diferenças no acúmulo de carbono da serapilheira entre os sistemas consorciados e a monocultura sugere que, aos 12 anos de estabelecimento dos sistemas agroflorestais (SAFs), o aporte foliar das espécies arbóreas não promoveu alterações expressivas no reservatório superficial de carbono em relação ao cafeeiro em monocultura. Esse comportamento pode estar relacionado à predominância da dinâmica foliar do cafeeiro no sistema. Como as folhas apresentam decomposição mais rápida que resíduos lenhosos, o estoque superficial tende a se manter semelhante entre os tratamentos devido à elevada taxa de renovação da biomassa. Essa fração pode representar até 77% do aporte em sistemas consorciados, favorecendo uma ciclagem acelerada e reduzindo o acúmulo de resíduos lignificados, como observado em florestas nativas (DE CARVALHO et al., 2024).

A redução dos estoques no segundo semestre em todos os tratamentos reflete a sazonalidade climática. O aumento da temperatura e da umidade favorece a atividade microbiana e acelera a decomposição da serapilheira, resultando em menor permanência de biomassa sobre o solo durante o período chuvoso, padrão comum em ecossistemas tropicais (OLIVEIRA, 2018). Além disso, o maior aporte observado numericamente no primeiro semestre pode estar relacionado ao caráter caducifólio da Teca (T2) e semidecíduo do Mogno Africano (T1). Conforme discutido por Henrique (2020), essas espécies intensificam a senescência foliar durante períodos de déficit hídrico como mecanismo de redução da perda de água por transpiração.

Embora sem diferença estatística, o consórcio com *Acrocarpus* (T3) apresentou tendência de maiores valores numéricos na entrelinha no segundo semestre (5,04 t C ha⁻¹), possivelmente relacionada ao rápido crescimento e à elevada renovação foliar dessa espécie. Espécies pioneiras e leguminosas tendem a apresentar metabolismo mais acelerado e deposição foliar contínua, favorecendo maior aporte orgânico ao solo (OLIVEIRA, 2018; HENRIQUE, 2020).

Diferente do observado em sistemas agroflorestais recém-implantados, nos quais o acúmulo de serapilheira tende a se concentrar próximo à linha de plantio das árvores (OLIVEIRA, 2018), este estudo demonstrou distribuição mais homogênea dos estoques de carbono entre linha e entrelinha. Aos 12 anos de implantação, a expansão das copas arbóreas e o manejo frequente da entrelinha podem ter contribuído para uma redistribuição mais uniforme dos resíduos vegetais sobre a superfície do solo. Essa uniformidade favorece a manutenção da umidade e a mitigação da temperatura do solo em toda a área cultivada, embora a serapilheira represente uma fração relativamente pequena do estoque total de carbono do sistema, contribuindo com cerca de até 2% do acúmulo total (DE SOUZA et al., 2012; VERAMENDI et al., 2025).

Alocação de Carbono no Cafeeiro

Diferentemente dos achados de Silva Neto et al. (2018), que não observaram variações no crescimento vegetativo do cafeeiro sob sombreamento (apenas 44 árvores ha⁻¹), este estudo verificou diferenças significativas no acúmulo de carbono das plantas. Essa divergência pode ser atribuída à maior idade do sistema avaliado (12 anos) e ao vigor das espécies arbóreas utilizadas nessa pesquisa (Mogno, Teca e Acrocarpus), que estabeleceram uma interação mais intensa com o estrato cafeeiro, além de ter sido implantado mais árvores por hectare no consórcio (82/ha).

O desempenho superior do consórcio café + Mogno Africano (T1) no estoque total da planta de café (25,94 t C ha⁻¹) demonstra um efeito sinérgico entre essas espécies. Diferente do observado com o Acrocarpus, o Mogno parece proporcionar um microclima ou uma interação radicular que favorece o acúmulo de biomassa aérea do cafeeiro, refletido principalmente nos ramos ortotrópicos (9,65 t C ha⁻¹), nas folhas (2,24 t C ha⁻¹), e no sistema radicular total (10,55 t C ha⁻¹). Já no Acrocarpus, se nota um efeito de sombra excessiva, comprovado pela quantidade de carbono do cafeeiro.

Os resultados do sistema radicular demonstram que os tratamentos influenciaram de forma distinta a alocação subterrânea de carbono. O consórcio Café + Mogno Africano (T1) apresentou os maiores estoques de carbono em raízes finas, indicando maior renovação radicular e potencial de aporte de carbono ao solo. Esse padrão sugere maior investimento em exploração do solo, possivelmente associado à competição moderada por recursos no sistema consorciado.

Em contrapartida, a monocultura (T4) apresentou maior acúmulo em raízes grossas, indicando maior alocação de carbono em estruturas de suporte e armazenamento. Já os consórcios com Teca (T2) e, principalmente, *Acrocarpus* (T3), apresentaram menores estoques radiculares, evidenciando que a espécie arbórea associada modula a dinâmica radicular do cafeeiro e o potencial de acúmulo de carbono no sistema. No caso do *Acrocarpus*, os menores valores reforçam a hipótese de competição interespecífica por água, luz e nutrientes.

Apesar da semelhança no aporte de serapilheira entre os sistemas, observa-se que os diferentes arranjos influenciaram a distribuição do carbono entre os compartimentos do sistema. O tratamento com *Acrocarpus* (T3), por exemplo, apresentou maiores estoques de carbono em profundidade no solo, enquanto os tratamentos com Mogno Africano (T1) e Teca (T2) favoreceram o acúmulo de carbono nas plantas de café.

Estudos como o de De Carvalho et al. (2024) demonstram que sistemas consorciados podem apresentar maior eficiência metabólica do solo, refletida em menores valores de quociente metabólico (qCO_2), o que indica maior incorporação de carbono à biomassa microbiana. Embora esse parâmetro não tenha sido avaliado diretamente neste estudo, tais evidências sugerem que mecanismos biológicos podem contribuir para a maior retenção de carbono observada em sistemas agroflorestais.

Um ponto crítico observado foi o desempenho do consórcio café + *Acrocarpus* (T3), que apresentou o menor estoque de carbono na planta de café ($12,86 \text{ t C ha}^{-1}$). Isso sugere a ocorrência de uma competição interespecífica acentuada. O crescimento agressivo do *Acrocarpus* (confirmado pelos $57,17 \text{ t C ha}^{-1}$ estocados na própria árvore) pode ter causado um sombreamento excessivo ou competição por nutrientes e água, limitando o desenvolvimento da cultura principal. Esse resultado é fundamental para o manejo, indicando a necessidade de podas mais frequentes em espécies de rápido crescimento para não comprometer o crescimento do café. Deve-se considerar mais estudos consorciados com leguminosas, visto que alguns estudos mostraram que esses sistemas acumularam mais carbono comparado ao consórcio com outras espécies (VALLEJOS-TORRES et al. 2024).

À exceção do consórcio com *Acrocarpus fraxinifolius* (T3), que gerou uma resposta de competição por recursos, o maior acúmulo de carbono nas plantas de café sob os tratamentos com Mogno Africano (T1) e Teca (T2) demonstra que a interação com essas

arbóreas favoreceu o desenvolvimento vegetativo da cultura e, o maior investimento radicular no sistema com mogno africano pode favorecer o acúmulo de carbono abaixo do solo nesse consórcio. Assim como observado por outros estudos (EHRENBERGEROVÁ et al. 2016; VALLEJOS-TORRES et al. 2024), que encontraram estoques de carbono significativamente superior em cafeeiros sombreados, a presença do componente arbóreo parece ter mitigado o estresse térmico e por radiação solar no T1 e T2.

O potencializado crescimento vegetativo sugere que o sombreamento moderado proporcionado por essas espécies criou um microclima favorável ao cafeeiro nos tratamentos T1 e T2, otimizando a alocação de biomassa aérea nas plantas de café. Por outro lado, a redução observada no T3 indica que o vigor e o crescimento acelerado do *Acrocarpus* podem ter excedido o limiar de benefício do sombreamento, resultando em competição por luz ou nutrientes, um fenômeno também reportado por Silva Neto et al. (2018) e Ehrenbergerová et al. (2016) em sistemas com espécies de alta dominância.

Alocação de Carbono no componente Arbóreo

A disparidade entre o carbono estocado pelo *Acrocarpus* (53,48 t C ha⁻¹) e as demais espécies (Mogno: 16,02; Teca: 13,40 t C ha⁻¹) evidencia a importância da escolha da espécie arbórea para fins de mitigação de mudanças climáticas (ORTIZ-CEBALLOS et al., 2020). O *Acrocarpus* funcionou como um dreno de carbono altamente eficiente no curto prazo, o que pode ser atribuído à sua natureza como espécie leguminosa.

Neste contexto, em sistemas agroflorestais com predominância de leguminosas, a incorporação de Nitrogênio (N) no solo via fixação biológica de N₂ e deposição de serapilheira rica em N é significativamente superior a sistemas sem essas espécies. Solos com teores elevados de N favorecem a assimilação de CO₂ através das trocas gasosas foliares, acelerando a conversão de carbono em biomassa vegetal por meio da fotossíntese das árvores (LAURINDO & SOUZA, 2020). Além disso, plantas com altas taxas fotossintéticas tendem a possuir sistemas radiculares mais ativos, liberando ácidos orgânicos que podem favorecer a ciclagem de nutrientes como o Fósforo (P) e aumentando a resiliência do sistema cafeeiro (RIBASKI et al., 2001).

No entanto, o balanço do sistema e a escolha da espécie arbórea deve ser analisado com cautela (SALGADO VERAMENDI et al., 2025): enquanto o T3 maximiza o carbono na madeira devido a esse metabolismo acelerado, ele reduz o carbono no cafeeiro por meio

de uma competição por recursos mais agressiva. Já o Mogno (T1) apresenta um equilíbrio mais favorável entre a produção de biomassa da árvore e a manutenção da biomassa da cultura agrícola, sugerindo que, embora o *Acrocarpus* seja um dreno superior de C, o Mogno permite uma convivência menos competitiva com o cafeeiro.

Embora o compartimento edáfico (solo) represente numericamente o maior reservatório de carbono do sistema, conforme observado por Veramendi et al. (2025) e Ruiz-García et al. (2022), a presença do componente arbóreo nos tratamentos T1 e T2 é o fator determinante para a adicionalidade de carbono do agroecossistema. As árvores de grande porte não apenas atuam como um sumidouro direto de rápido acúmulo na biomassa aérea, mas também servem como a principal fonte de aporte orgânico e proteção térmica para o solo, garantindo a manutenção e o incremento das reservas de carbono orgânico em longo prazo.

Dinâmica de Carbono no Perfil do Solo

A superioridade da Mata secundária (T5) em relação aos sistemas cultivados no estoque de carbono nas maiores profundidades confirma que a conversão de áreas naturais para uso agrícola impõe um desafio à manutenção das reservas originais de carbono. A comparação entre os sistemas cultivados e a referência de Mata revela uma redução acentuada nos teores de C conforme a profundidade aumenta, um padrão de dinâmica de carbono típico da conversão de uso da terra em Latossolos cafeeiros (EHRENBERGEROVÁ et al. 2016; DE CARVALHO et al. 2024).

Contudo, a semelhança estatística observada na camada superficial (0-10 cm) entre os sistemas agroflorestais e a mata secundária sugere que o aporte constante de serapilheira nos sistemas consorciados é eficaz em manter a estabilidade do carbono na interface solo-atmosfera. No entanto, dentro dessa estabilidade, observa-se uma tendência de maior estoque no tratamento com Teca (T2). Esse início de diferenciação pode ser atribuído ao aporte de serapilheira e à proteção física do solo, mecanismos de conservação essenciais para a qualidade edáfica em cafezais. (GUIMARÃES et al., 2019).

A estabilidade no teor de carbono na camada superficial (0-10 cm) entre os sistemas estudados com 12 anos de implantação corrobora os achados de Guimarães et al. (2017) e De Souza et al. (2012). Ao avaliar uma lavoura de café com 10 anos de consórcio em solo e clima semelhantes, os autores também não verificaram diferenças significativas no estoque

de carbono do solo, representado pelo carbono orgânico do solo (COS), entre o sistema arborizado e a monocultura, pois o COS é um indicador de baixa sensibilidade a curto e médio prazo, exigindo um longo período de residência para que o aporte de biomassa se converta em frações estáveis que superem a variabilidade natural do solo (GUIMARÃES et al. 2017).

Na camada intermediária (10-30 cm), o destaque do consórcio café + Teca (T2) pode estar associado à qualidade química da sua serapilheira ou a um padrão de renovação de raízes finas que favorece a humificação nessa zona. Contudo, o resultado mais expressivo ocorre na camada profunda (30-60 cm), onde a análise dos estoques revela que o consórcio café + *Acrocarpus* (T3) superou os demais cultivos (54,4 t C ha⁻¹). Este achado explica a menor biomassa observada na planta de café do T3: o *Acrocarpus* apresenta um sistema radicular extremamente agressivo e profundo. Devido à sua natureza leguminosa e rápido crescimento, essa espécie promove a deposição de carbono via rizodeposição e exsudação radicular em camadas onde o C é menos suscetível à oxidação microbiana. Como destacado por Moreira et al. (2023), plantas com altas taxas fotossintéticas e fixação biológica de Nitrogênio tendem a ter sistemas radiculares mais ativos, o que justifica o sequestro de carbono em profundidade como um diferencial para a resiliência climática.

A expressiva presença de carbono nas camadas subsuperficiais no tratamento com *Acrocarpus* (T3) corrobora os achados de Solis et al. (2020), que ao avaliarem sistemas cafeeiros até 60 cm de profundidade, constataram que o solo é o principal reservatório de carbono, representando até 96% do estoque total do ecossistema. Esse resultado enfatiza que, embora espécies leguminosas possam exercer competição aérea com o cafeeiro, sua contribuição para a mitigação das mudanças climáticas é significativa, pois promovem o armazenamento de carbono em compartimentos mais estáveis do solo, superando o potencial de sistemas monocultivos.

Por fim, a monocultura (T4), embora tenha mantido estoques razoáveis na superfície, mostrou-se menos eficiente na manutenção do carbono em profundidade. Isso reforça que, embora o estoque superficial possa parecer similar entre os sistemas no médio prazo (GUIMARÃES et al., 2017), a diversidade de sistemas radiculares nos sistemas agroflorestais é o verdadeiro motor para a construção de reservatórios de carbono estáveis em horizontes mais profundos.

Além do potencial de sequestro de carbono, a maior diversidade de arquiteturas radiculares em sistemas agroflorestais contribui para melhorias físicas, químicas e biológicas do solo. A ocupação de diferentes nichos no perfil edáfico favorece a descompactação biológica, o aumento da porosidade e da infiltração de água, além de reduzir perdas de nutrientes por lixiviação. Adicionalmente, a deposição de resíduos radiculares e exsudatos estimula a atividade microbiana e a formação de agregados estáveis, promovendo maior ciclagem de nutrientes, estabilidade estrutural e resiliência do sistema cafeeiro frente a estresses ambientais (SOLIS et al., 2020; STEINFELD et al., 2023; VALLEJOS-TORRES et al., 2024).

De forma geral, este estudo detalhou o acúmulo de carbono em cada componente do sistema de produção cafeeiro, observando que os consórcios superaram o sistema solteiro em termos de estoque total. Esse padrão de superioridade dos sistemas agroflorestais em relação à monocultura é amplamente corroborado pela literatura (EHRENBERGEROVÁ et al., 2016; ORTIZ-CEBALLOS et al., 2020; SOLIS et al., 2020; RUIZ-GARCÍA et al., 2021; VALLEJOS-TORRES et al., 2024). Tais resultados indicam que a integração de árvores amplia a capacidade de sequestro de carbono do ecossistema como um todo.

Ao considerar o carbono total do sistema cafeeiro, incluindo serapilheira, solo, cafeeiro e componente arbóreo, verificou-se que o tratamento T3 apresentou incremento de 71,41 t C ha⁻¹ em relação à monocultura (T4), o que corresponde a aproximadamente 262,1 t ha⁻¹ de CO₂ equivalente (CO₂e), utilizando o fator de conversão 3,67 proposto pelo IPCC (2006). Esse resultado evidencia o potencial dos sistemas agroflorestais em ampliar a retenção de carbono e atuar como estratégia de mitigação das mudanças climáticas em regiões tropicais.

Apesar do maior estoque de carbono observado no sistema produtivo total, o consórcio com *Acrocarpus fraxinifolius* (T3) gerou uma competição com a cultura principal, reduzindo a biomassa aérea do café. Esse resultado diverge de pesquisas como a de Vallejos-Torres et al. (2024), que encontraram maior estoque no café consorciado com Ingá (espécie leguminosa). No entanto, é fundamental considerar que o carbono estocado apenas nos cafeeiros corresponde a uma fração muito pequena, entre 2% e 7% do total do sistema. Dessa forma, a redução pontual do carbono na planta de café é compensada pelos ganhos expressivos do sistema integrado, especialmente no solo profundo, onde reside a maior parte

do estoque de carbono (VALLEJOS-TORRES et al., 2024; SALGADO VERAMENDI et al., 2025).

5 CONCLUSÃO

A escolha da espécie arbórea influenciou a magnitude e a distribuição dos estoques de carbono no sistema cafeeiro. Os sistemas agroflorestais aumentaram o acúmulo de carbono e promoveram diferentes padrões de redistribuição desse elemento entre os compartimentos vegetal e edáfico. O consórcio Café + Mogno Africano apresentou maior acúmulo de carbono na planta e no sistema radicular do cafeeiro, enquanto o sistema Café + Acrocarpus destacou-se pelo maior estoque de carbono na biomassa arbórea e nas camadas mais profundas do solo. Por outro lado, o menor acúmulo de carbono na planta de café no sistema com Acrocarpus evidencia possíveis trade-offs entre o potencial de sequestro de carbono e o desenvolvimento da cultura. O consórcio com Teca apresentou comportamento intermediário, com maior contribuição nas camadas superficiais do solo. Apesar das diferenças nos estoques de carbono, a produtividade do cafeeiro não diferiu estatisticamente entre os tratamentos no ano avaliado. Contudo, estudos de longa duração ainda são necessários para compreender os efeitos desses sistemas sobre a produtividade ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

AMORIM, H. C. S. et al. Soil structure and organic carbon dynamics from agroforestry and conventional coffee systems in a clayey Oxisol. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S. l.], v. 397, p. 110042, 2026.

AMUDA, L. A. R. Crescimento, morfometria e qualidade da madeira de espécies arbóreas em sistema agroforestry com cafeeiro. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2025.

AWAZI, N. P. Climate change mitigation and adaptation in Cameroon through cocoa and coffee-based agroforestry systems. **Discover Forests**, v. 1, n. 1, p. 8, 2025.

CHAVE, J. et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, [S. l.], v. 20, n. 10, p. 3177-3190, 2014.

DE CARVALHO, F. F. et al. Effects of Coffee arabica cultivation systems on tropical soil microbial biomass and activity in the northeast region of Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 7, p. 2397-2410, 2024.

DE OLIVEIRA SALES, E. P. et al. Do coffee agroforestry systems favor carbon and glomalin input in soil biogenic aggregates. **Catena**, [S. l.], v. 249, p. 108685, 2025.

DE SOUZA, H. N. et al. Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 146, n. 1, p. 179-196, 2012.

EHRENBERGEROVÁ, L. et al. Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. **Agroforestry systems**, v. 90, n. 3, p. 433-445, 2016.

GUIMARÃES, G. P. et al. Soil aggregation and organic carbon of Oxisols under coffee in agroforestry systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 43, e0180184, 2019.

GUIMARÃES, N. de F. et al. Biomassa e atividade microbiana do solo em diferentes sistemas de cultivo do cafeeiro. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 34-44, 2017.

HENRIQUE, N. S. Aporte e decomposição de serapilheira e qualidade do solo em sistemas de cafeeiro sombreado e a pleno sol. 2020.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama: IGES, 2006.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023.

LAL, R. Abating climate change and feeding the world through soil carbon sequestration. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 188, p. 51-54, 2019.

LAURINDO, L. K.; SOUZA, T. A. F. Indicadores da qualidade do solo em sistemas agroflorestais e ecossistemas associados. **Curitibanos: PPGEAN/UFSC**, v. 1, p. 102, 2020.

LUGO-PÉREZ, J. et al. The importance of shade trees in promoting carbon storage in the coffee agroforest systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 355, p. 108594, 2023.

MOREIRA, M. F. et al. Sistemas agroflorestais e consórcios na cultura do café. 2023.

OLIVEIRA, E. S. de. Arranjos de árvores na deposição de serapilheira e atributos físicos do solo em cafezal. 2018.

ORTIZ-CEBALLOS, G. C. et al. Aboveground carbon storage in coffee agroecosystems: The case of the central region of the state of Veracruz in Mexico. **Agronomy**, v. 10, n. 3, p. 382, 2020.

PARAJULI, B. et al. Influence of Land-Use Practices on Soil Organic Carbon and Microbial Biomass in Coffee and Orange Agroecosystems. **Land**, [S. l.], v. 13, n. 12, p. 2076, 2024.

PRAMULYA, R. et al. Assessment of Gayo agroforestry coffee characteristics and carbon stock potential in Mumuger social forestry area, Central Aceh Regency. **Trees, Forests and People**, [S. l.], v. 20, p. 100818, 2025.

RIBASKI, J. et al. Sistemas agroflorestais: aspectos ambientais e sócio-econômicos. 2001.

RUIZ-GARCÍA, P. et al. Carbon stocks in coffee (*C. arabica* L.) agroforestry systems in the face of climate change: México case. **Agronomía Mesoamericana**, v. 33, n. 3, 2022.

SALGADO VERAMENDI, N. et al. Carbon Storage in Coffee Agroforestry Systems: Role of Native and Introduced Shade Trees in the Central Peruvian Amazon. **Agriculture**, v. 15, n. 13, p. 1415, 2025.

SEGURA, M.; KANNINEN, M.; SUÁREZ, D. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. **Agroforestry Systems**, [S. l.], v. 68, n. 2, p. 143-150, 2006.

STEINFELD, J. P. et al. Increasing complexity of agroforestry systems benefits nutrient cycling and mineral-associated organic carbon storage, in south-eastern Brazil. **Geoderma**, v. 440, p. 116726, 2023.

SILVA NETO, F. J. da et al. Shade trees spatial distribution and its effect on grains and beverage quality of shaded coffee trees. **Journal of Food Quality**, v. 2018, n. 1, p. 7909467, 2018.

SILVEIRA, H. R. de O. et al. Impactos da deficiência hídrica nas respostas ecofisiológicas e espectrais do cafeeiro consorciado com espécies madeireiras. 2016.

TAVARES, P. D. et al. Carbon stock in different compartments of coffee agroforestry systems. **Journal of Agricultural Science**, [S. l.], v. 12, n. 4, p. 111-121, 2020.

TEIXEIRA, P. C. et al. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p. 2017.

TINOCO, J. A. et al. Carbon storage in coffee agroforestry systems: a bibliometric analysis and meta-analysis. **Agroforestry Systems**, v. 100, n. 1, p. 5, 2026.

VALLEJOS-TORRES, G. et al. Carbon reserves in coffee agroforestry in the Peruvian Amazon. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1410418, 2024.

VOLPATO, M. M. L. et al. Relação entre índices de vegetação de áreas cafeeiras e variáveis do balanço hídrico, em Santo Antônio do Amparo, MG. 2019.

Agradecimentos: Esta pesquisa contou com o apoio financeiro da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), do Consórcio Pesquisa Café, do Conselho

Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia do Café (INCT Café).

Agradecemos a todos que gentilmente contribuíram direta e indiretamente para este trabalho, bem como à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e à EPAMIG. Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas de estudo.

Artigo 2 - Elaborado conforme a norma NBR 6022	
Título do artigo:	Acúmulo De Carbono Na Cafeicultura Sob Diferentes Manejos De Plantas de Espontâneas
Autores:	Índira Pereira de Oliveira, Regis Pereira Venturin, Elifas Nunes de Alcântara, André Dominghetti Ferreira, Vinícius Teixeira Andrade, Andreisa Fabri Lima, Leônidas Canuto Santos, Vânia Aparecida Silva, Vladimir Eliodoro Costa, Gladyston Rodrigues Carvalho



**ARTIGO 2 - ACÚMULO DE CARBONO NA CAFEICULTURA SOB DIFERENTES
MANEJOS DE PLANTAS ESPONTÂNEAS
CARBON ACCUMULATION IN COFFEE CULTIVATION UNDER DIFFERENT
WEED MANAGEMENT PRACTICES ²**

Indira Pereira de Oliveira

<https://orcid.org/0000-0002-0105-505X>

Regis Pereira Venturin

<https://orcid.org/0000-0002-2309-4367>

Elifas Nunes de Alcântara

<https://orcid.org/0000-0001-6986-1042>

André Dominghetti Ferreira

<https://orcid.org/0000-0002-6512-4923>

Vinícius Teixeira Andrade

<https://orcid.org/0000-0002-0011-2788>

Andreisa Fabri Lima

<https://orcid.org/0000-0001-6537-0756>

Leônidas Canuto Santos

<https://orcid.org/0000-0002-0385-4736>

Vânia Aparecida Silva

<https://orcid.org/0000-0001-6640-3644>

Vladimir Eliodoro Costa

<http://orcid.org/0000-0003-3889-7514>

Gladyston Rodrigues Carvalho

<https://orcid.org/0000-0002-4466-674X>

Resumo: O manejo de plantas espontâneas na entrelinha do cafeeiro influencia diretamente a dinâmica e o estoque de carbono nos compartimentos vegetal e edáfico do sistema. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar como diferentes estratégias de manejo da vegetação espontânea afetam o acúmulo e a distribuição de carbono em um cafezal conduzido em Latossolo Vermelho distroférrico no município de São Sebastião do Paraíso, MG. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, com sete tratamentos: trincha, herbicida residual, herbicida de contato, roçadeira, capina manual, sem capina e mata secundária como referência. Foram avaliados os estoques de carbono na serapilheira, biomassa do cafeeiro, sistema radicular e solo nas profundidades de 0–10, 10–30 e 30–60 cm. O tratamento sem capina apresentou os maiores estoques de carbono no solo e no sistema total, alcançando valores semelhantes aos observados na mata secundária, especialmente nas camadas subsuperficiais. Em contraste, o uso de herbicida residual resultou nos menores estoques de carbono em praticamente todos os compartimentos avaliados. O manejo com roçadeira promoveu maior acúmulo de carbono na biomassa aérea do cafeeiro, principalmente em ramos plagiotrópicos e folhas. Apesar das diferenças nos estoques de carbono, não foram observadas diferenças significativas na produtividade do cafeeiro entre os tratamentos. Os resultados demonstram que manejos conservacionistas, com maior permanência de cobertura

² Artigo científico apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Cafeicultura.

vegetal, favorecem o acúmulo e a estabilização de carbono no sistema cafeeiro, contribuindo para a sustentabilidade e mitigação das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Carbono No Solo; Plantas Daninhas; Manejo Agrícola; *Coffea Arabica* L.; Produtividade.

Abstract: The management of spontaneous vegetation between coffee rows directly influences carbon dynamics and storage in both plant and soil compartments of the system. Thus, this study aimed to evaluate how different weed management strategies affect carbon accumulation and distribution in a coffee plantation cultivated on a Rhodic Hapludox soil in São Sebastião do Paraíso, Minas Gerais, Brazil. The experiment was conducted using a randomized block design with seven treatments: shredder mowing, residual herbicide, contact herbicide, mechanical mowing, manual hoeing, no weeding, and secondary forest as a reference ecosystem. Carbon stocks were evaluated in litterfall, coffee plant biomass, root system, and soil at depths of 0–10, 10–30, and 30–60 cm. The no-weeding treatment showed the highest carbon stocks in the soil and in the total system, reaching values like those observed in the secondary forest, especially in subsurface layers. In contrast, the use of residual herbicide resulted in the lowest carbon stocks in nearly all evaluated compartments. Mechanical mowing promoted greater carbon accumulation in the aerial biomass of coffee plants, particularly in plagiotropic branches and leaves. Despite differences in carbon stocks, no significant differences were observed in coffee yield among treatments. The results demonstrate that conservation-oriented management practices, with greater maintenance of vegetation cover, favor carbon accumulation and stabilization in coffee systems, contributing to sustainability and climate change mitigation.

Keywords: Soil carbon; Spontaneous plants; Agricultural management; *Coffea arabica* L.; Yield.

1 INTRODUÇÃO

O manejo adequado das plantas espontâneas nas lavouras cafeeiras é essencial para a sustentabilidade e manutenção da produtividade na cafeicultura. Entre as principais estratégias utilizadas destacam-se práticas manuais, como a capina, práticas mecanizadas por meio de roçadeiras e trinchas, além do uso de herbicidas. Essas práticas influenciam diretamente a competição por água, luz e nutrientes entre a vegetação espontânea e o cafeeiro, podendo também afetar a cobertura do solo, a ciclagem de nutrientes e a dinâmica da matéria orgânica. Quando realizado de forma inadequada, o manejo da vegetação espontânea pode resultar em perda de vigor das plantas, redução do crescimento e, conseqüentemente, diminuição da produtividade e longevidade da lavoura (MESQUITA et al., 2016; SANTOS et al., 2022; FERREIRA et al., 2021).

Historicamente, as plantas espontâneas eram vistas apenas como prejudiciais à cultura do café, com esforços concentrados na sua erradicação. No entanto, compreende-se agora que a manutenção das plantas espontâneas sob manejo controlado pode oferecer benefícios à lavoura cafeeira, como a regulação da temperatura e umidade do solo, ciclagem de nutrientes e aumento do teor de matéria orgânica (AMORIM et al., 2026; TEIXEIRA et al., 2021). A mudança de paradigma substitui a prática tradicional de eliminação total das plantas espontâneas pelo manejo e conservação dessas plantas no solo, visando a proteção do recurso solo.

A presença de vegetação associada à cultura cultivada fornece serviços ecossistêmicos fundamentais, como o aumento do acúmulo de matéria orgânica (MO), que inclui o carbono orgânico do solo (COS). O COS é fundamental para a qualidade do solo, influenciando diretamente suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Maiores teores de matéria orgânica reduzem a necessidade de aplicação de insumos químicos devido à redução da erosão e da lixiviação de nutrientes, além de sustentar uma microbiota mais rica que atua na ciclagem de nutrientes (RIGAL et al., 2020; MARTINEZ et al., 2023; SALGADO VERAMENDI et al., 2025).

O carbono orgânico do solo tem recebido atenção crescente como um indicador vital da qualidade do solo, refletindo sua saúde e fertilidade. Este elemento desempenha um papel crucial na manutenção da produtividade biológica, qualidade da água e mitigação climática através do incremento nos estoques de carbono. Diversos sistemas de uso da terra

e intensidades de manejo podem afetar significativamente os reservatórios de carbono orgânico no solo (MA et al., 2023; AWAZI, 2025).

Práticas de manejo mecânico, como o uso de roçadeiras ou trinchas em substituição ao controle químico total, são fundamentais para promover o acúmulo de matéria orgânica e, conseqüentemente, melhorar a resiliência do cafezal. A compreensão da dinâmica do COS e seu impacto no ecossistema é essencial para a conservação da biodiversidade e para a promoção de práticas agrícolas sustentáveis em um cenário de mudanças climáticas globais (COGO et al., 2013; VALLEJOS-TORRES et al., 2024; AMORIM et al., 2026).

Assim, este estudo teve como objetivo avaliar como diferentes manejos de plantas espontâneas na entrelinha do cafeeiro influenciam a dinâmica e o estoque de carbono nos compartimentos vegetal e edáfico do sistema, buscando identificar estratégias de manejo mais sustentáveis para a cafeicultura.

2 METODOLOGIA

Caracterização da área experimental

O estudo foi conduzido no Campo Experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), em São Sebastião do Paraíso, MG (coordenadas 20° 55’ S e 46° 55’ W). A vegetação original é caracterizada como Floresta Estacional Semidecídua em transição para o Cerrado, sob relevo com declividade média de 8%. O clima regional é tropical úmido (tipo Cwa, segundo Köppen), com temperatura e precipitação médias anuais de 20,8 °C e 1.470 mm, respectivamente (ALCÂNTARA, 2015). O solo da área foi classificado como latossolo vermelho distroférico (SOLOS, EMBRAPA et al., 2013), de textura argilosa (570 g kg⁻¹ de argila, 230 g kg⁻¹ de silte e 200 g kg⁻¹ de areia), desenvolvido sobre basalto da Formação Serra Geral.

Tabela 1. Caracterização químicas do latossolo vermelho distroférico da área do experimento.

Latossolo vermelho distroférico												
pH	K	P	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	m
		mg dm ⁻³					cmol _c dm ⁻³				%	
5.76	70.4	16.19	0.004	2.51	0.52	0.12	3.70	3.21	3.32	6.91	46.22	5.89
MO	CO	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S					
%		mg dm ⁻³										
2.66	1.53	6.66	38.35	37.75	12.52	0.37	89.67					

pH em água: potencial hidrogeniônico em água; Al: alumínio – extrator: KCl 1 mol L⁻¹; H + Al: acidez potencial; Ca: cálcio; Mg: magnésio; K: potássio; P: fósforo; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; S: enxofre – extrator: fosfato monocalcico em ácido acético; MO: matéria orgânica – oxidação: Na₂Cr₂O₇ 4N + H₂SO₄ 10N; SB: soma de bases trocáveis; t: capacidade de troca catiônica efetiva (CTC); T: capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: saturação por bases; m: índice de saturação por alumínio. P, K, Fe, Zn, Mn e Cu – extrator: Mehlich-1; H + Al – extrator: SMP; Abaixo do limite de detecção (0,08 mg dm⁻³).

A área experimental foi originalmente estabelecida em 1975 com a cultivar Catuaí Vermelho IAC 99. Após danos causados por geada, a área foi replantada em 2006 utilizando a cultivar Paraíso MG H 419-1. A lavoura de café foi implantada com espaçamento de 4,0 m entre linhas e 0,7 m entre plantas. O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados (DBC), com sete tratamentos e três repetições. Cada unidade experimental foi composta por três linhas de plantio, sendo as avaliações realizadas na rua central (entrelinha). A linha foi mantida limpa durante todo o experimento.

Os tratamentos consistiram em diferentes estratégias de controle da vegetação espontânea nas entrelinhas do cafezal: Trincha (T1): Manejo mecânico com fragmentação da biomassa; Herbicida Residual (T2): Aplicação de oxyfluorfen (0,72 kg ha⁻¹); Herbicida de Contato (T3): Aplicação de glifosato (0,72 kg ha⁻¹); Roçadeira (T4): Corte da parte aérea com deposição de resíduos; Capina Manual (T5): Remoção manual das plantas espontâneas por meio de enxada; Sem Capina (T6): Testemunha com crescimento livre da vegetação na entrelinha (a linha de plantio do café era mantida limpa); Mata secundária (T7): Referência de ecossistema, localizada no mesmo complexo geográfico da fazenda, imediatamente adjacente ao plantio experimental de café.

Todas as práticas de manejo foram padronizadas e executadas sempre que a comunidade de plantas espontâneas atingia uma altura média de 30-35 cm na área entre as linhas de plantio. Esse critério resultou em aproximadamente quatro intervenções anuais para garantir níveis consistentes de competição entre os tratamentos. Essas intervenções foram conduzidas primordialmente de novembro a abril, coincidindo precisamente com os estágios fenológicos mais críticos do cafeeiro, incluindo a floração, a expansão dos frutos e o enchimento de frutos (granação). Em contraste, o tratamento pré-emergente foi aplicado apenas uma vez ao ano, imediatamente após a colheita, durante o período de repouso fisiológico.

Amostragem e Quantificação de Carbono

A biomassa da serapilheira acumulada foi quantificada seguindo a metodologia de Tavares et al. (2020). Utilizou-se um gabarito metálico de 0,50 x 0,50 m (0,25 m²), com amostragens realizadas no primeiro e segundo semestre de 2023, visando caracterizar a dinâmica de acúmulo nos períodos seco e chuvoso. Em cada parcela, foram coletadas duas amostras representativas (linha e entrelinha), totalizando seis unidades amostrais por sistema em cada época.

O material foi pesado para obtenção da massa fresca e seco em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até atingir massa constante. Após a secagem e moagem em moinho tipo Willey, o teor de Carbono Orgânico Total (COT) foi determinado por combustão a seco em Analisador Elementar, seguindo Teixeira et al. (2017).

A quantificação da biomassa das plantas de café foi realizada pelo método destrutivo no segundo semestre de 2023, conforme preconizado por Segura et al. (2006) para estudos de partição de biomassa em cafeeiros. Foram coletadas duas plantas representativas por unidade experimental, sendo as raízes extraídas completamente do solo para análise do sistema radicular de apenas uma planta por tratamento.

As plantas foram separadas em cinco compartimentos: ramos ortotrópicos, ramos plagiotrópicos, folhas, raízes finas e raízes grossas. Após a pesagem da massa fresca total de cada órgão em campo, subamostras foram retiradas e transportadas ao laboratório para determinação da matéria seca. Seguindo a metodologia de Tavares et al. (2020), o material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até atingir massa constante (aproximadamente 72 horas). O teor de Carbono Orgânico Total (COT) foi determinado pela mesma metodologia de serapilheira Teixeira et al. (2017).

A biomassa para cada órgão da planta (ramo ortotrópico, ramo plagiotrópicos, folhas, raízes finas e raízes grossas) e o estoque de carbono por hectare foram calculados com base na área ocupada por 5000 pés de café dentro de 1 hectare, utilizando-se as seguintes equações:

$$Biomassa(g): B_{\text{órgão da planta}} = \frac{PF \times PSA}{PFA} \text{ eq.1}$$

Onde: PF = peso fresco total; PSA = peso seco da amostra; PFA = peso fresco da amostra.

O estoque de carbono nos compartimentos foi obtido a partir da biomassa seca, utilizando o teor de carbono determinado em laboratório para o material vegetal, conforme a Equação 2 (eq.2):

$$\text{Estoque de Carbono por Órgão (kg)}: C_{\text{órgão}} = B_{\text{órgão}} \times \frac{C\%}{100} \text{ eq. 2}$$

em que $C_{\text{órgão}}$ corresponde ao carbono presente no órgão da planta em kg (ramos, folhas ou raízes) e $C\%$ é o teor de carbono do tecido vegetal (%). Finalmente foi feita a extrapolação da quantidade de carbono para a área de 1 hectare pela equação 3 (eq.3), onde o Carbono total (C_{total}) = carbono do compartimento $\times 3.570$ plantas ha^{-1} / 1000. A divisão por 1000 foi para transformação de Kg para toneladas por hectare:

$$\text{Extrapolação para Área (ha}^{-1}\text{)}: C_{\text{total}} = \frac{C_{\text{órgão}} \times 3.570}{1000} \text{ eq. 3}$$

Para as raízes, utilizou-se o método volumétrico para estimar a densidade de biomassa (kg m^{-3}) em buracos de volume conhecido. A biomassa seca e o estoque de C por hectare foram calculados considerando a densidade de plantio de 3.570 plantas ha^{-1} (4,0 x 0,7 m), utilizando-se as equações:

$$M S_{\text{total}} = PF \times \frac{PSA}{PFA} \text{ eq. 1}$$

$$\text{Acúmulo de carbono} = M S_{\text{total}} \times \text{cot} \text{ eq. 2}$$

Onde: PF é o peso fresco total; PSA é o peso seco da amostra; PFA é o peso fresco da amostra e COT é o teor de carbono orgânico. O carbono total da planta foi obtido pelo somatório dos compartimentos aéreo e radicular.

Amostras de solo deformadas foram coletadas nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm, nas posições de linha e entrelinha. Amostras indeformadas foram coletadas com anéis volumétricos para a determinação da densidade aparente do solo (D_s). Essas amostras foram realizadas no primeiro semestre de 2023.

O teor de Carbono Orgânico Total (COT) no solo foi determinado via oxidação úmida com dicromato de potássio em meio ácido (TEIXEIRA et al., 2017). O estoque de carbono no solo (ECS, em t ha^{-1}) para cada camada foi calculado pela expressão:

$$ECS = \text{cot} \times Ds \times e \times 10 \text{ eq.3}$$

Onde: COT é o teor de carbono (g kg^{-1}); Ds é a densidade do solo (g cm^{-3}); e é a espessura da camada (m). Seguindo Cogo et al. (2013), assumiu-se a homogeneidade de Ds e COT entre linha e entrelinha dentro de cada tratamento para o cálculo do estoque por área.

Análise estatística

Os dados foram inicialmente avaliados quanto aos pressupostos de normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk e de homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. Quando os pressupostos não foram atendidos, aplicou-se a transformação logarítmica ($\log_{10}$), procedimento recomendado para variáveis biométricas de distribuição assimétrica.

Em seguida, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em delineamento de blocos casualizados, considerando os tratamentos como efeito fixo e os blocos como efeito de controle. Quando detectado efeito significativo de tratamentos ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Todas as análises e os gráficos foram realizados no software R, versão 4.3.0 (R Development Core Team, 2023).

4 RESULTADOS

A análise do estoque de carbono na serapilheira revelou dinâmicas distintas entre a linha de plantio e a entrelinha, bem como variações sazonais marcantes entre os semestres avaliados (Tabela 2).

Na linha de plantio, não foram observadas diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os manejos de plantas espontâneas em nenhuma das épocas amostradas (tabela 2). No primeiro semestre, os estoques de carbono variaram de 5,10 a 9,21 t ha^{-1} entre os manejos cafeeiros, enquanto a Mata secundária apresentou 13,27 t ha^{-1} . No segundo semestre, houve uma redução generalizada nos valores, com as médias situando-se entre 1,26 e 4,68 t ha^{-1} para os tratamentos de manejo.

Diferentemente da linha, a entrelinha apresentou variações altamente significativas em ambos os períodos. No primeiro semestre, o tratamento Sem Capina (T6) destacou-se com 12,85 t ha^{-1} , valor estatisticamente igual ao da Mata secundária (T7) (13,27 t ha^{-1}). Em contraste, os tratamentos com controle químico (T2 e T3) e mecânico (T1 e T4)

apresentaram os menores estoques, com valores próximos a zero nos tratamentos com herbicidas.

No segundo semestre, mantendo a tendência, o T6 (6,63 t ha⁻¹) e a Mata secundária (6,07 t ha⁻¹) permaneceram no grupo com maiores acúmulos, embora com valores reduzidos em comparação ao início do ano. Os tratamentos T2, T3 e T4 formaram o grupo com menor aporte de carbono superficial (1,0 t ha⁻¹), evidenciando que o controle rigoroso de plantas espontâneas na entrelinha expõe o solo e reduz drasticamente a ciclagem de carbono via serapilheira.

Tabela 2. Valores médios do acúmulo de carbono na serapilheira em cada tratamento (t/ha) na linha (L) e na entrelinha (EL), no primeiro e no segundo semestre (Sem).

Sem	local	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
1º	L	9,21	8,85	7,14	7,14	6,15	5,10	13,2
		ns	ns	ns	ns	ns	ns	7ns
	EL	1,18	0,01	0,75	2,01	0,57	12,8	13,2
		b	b	b	b	b	5a	7a
2º	L	3,69	4,43	1,26	2,95	4,68	3,18	6,07
		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	EL	1,19	0,08	0,78	0,58	2,24	6,63	6,07
		bc	c	c	c	bc	ab	a

T1: trincha; T2: herbicida residual; T3: herbicida de contato; T4: roçadeira; T5: capina manual; T6: sem capina; T7: Mata secundária (Referência). Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). ns: não significativo.

O estoque de carbono nos ramos ortotrópicos variou entre 10,54 e 14,94 t ha⁻¹ (figura 1). Apesar das variações numéricas observadas entre as médias, a análise de variância não indicou diferença estatística significativa ($p = 0,385$).

Diferentemente do observado nos ramos ortotrópicos, o estoque de carbono nos ramos plagiotrópicos apresentou variações significativas entre os manejos de plantas espontâneas (Figura 2). O T4 (Roçadeira) destacou-se com o maior acúmulo médio (14,96 t ha⁻¹), sendo o único a compor o grupo superior aos demais tratamentos. Os demais tratamentos apresentaram estoques significativamente menores, com médias de 7,88 t ha⁻¹ (trincha: T1), 5,72 t ha⁻¹ (capina manual: T5), 5,29 t ha⁻¹ (herbicida residual: T2) e 4,94 t ha⁻¹ (herbicida de contato: T3). O menor valor numérico foi registrado no T6 (Sem Capina), com apenas 2,53 t ha⁻¹.

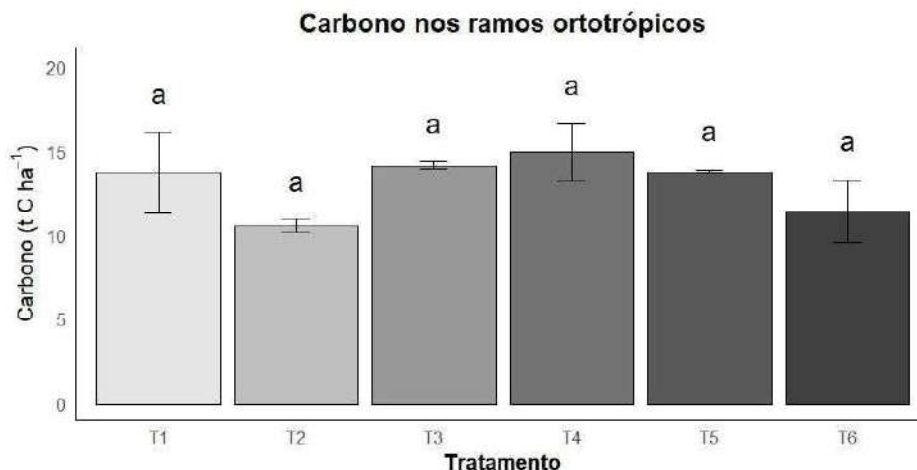


Figura 1. Carbono de ramos ortotrópicos de cafeeiros (t C ha⁻¹). T1: trincha; T2: herbicida residual; T3: herbicida de contato; T4: roçadeira; T5: capina manual; T6: sem capina. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

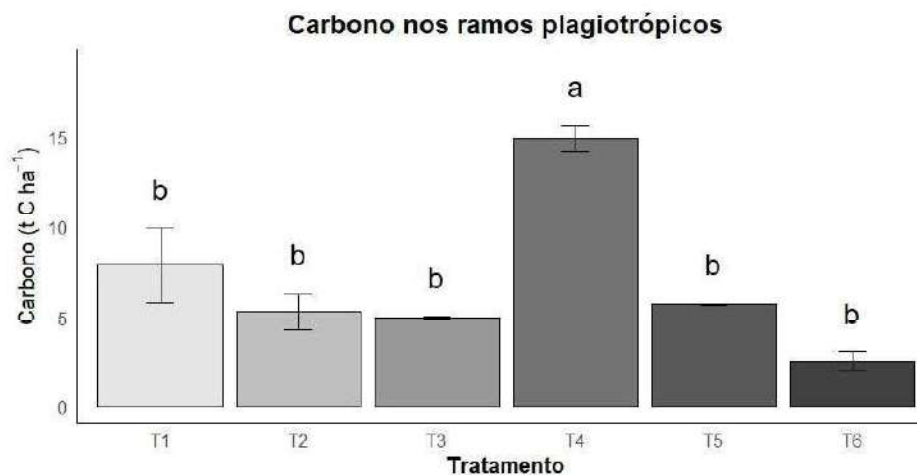


Figura 2. Carbono de ramos plagiotrópicos de cafeeiros (t C ha⁻¹). T1: trincha; T2: herbicida residual; T3: herbicida de contato; T4: roçadeira; T5: capina manual; T6: sem capina. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

O estoque de carbono nas folhas apresentou comportamento semelhante ao observado nos ramos plagiotrópicos, com variações significativas entre os manejos (figura 3). O T4 (Roçadeira) destacou-se novamente com o maior acúmulo (5,72 t ha⁻¹), superando substancialmente os demais tratamentos. O manejo com capina manual (T5) apresentou um valor intermediário (2,83 t ha⁻¹), enquanto os tratamentos T1, T2, T3 e T6 exibiram os menores estoques, com médias situadas entre 2,06 e 2,44 t ha⁻¹. Essa superioridade do T4 confirma que o manejo com roçadeira favoreceu o desenvolvimento vegetativo do cafeeiro, refletindo-se em um incremento direto da biomassa foliar e, conseqüentemente, em uma maior capacidade de estocagem de carbono neste compartimento.

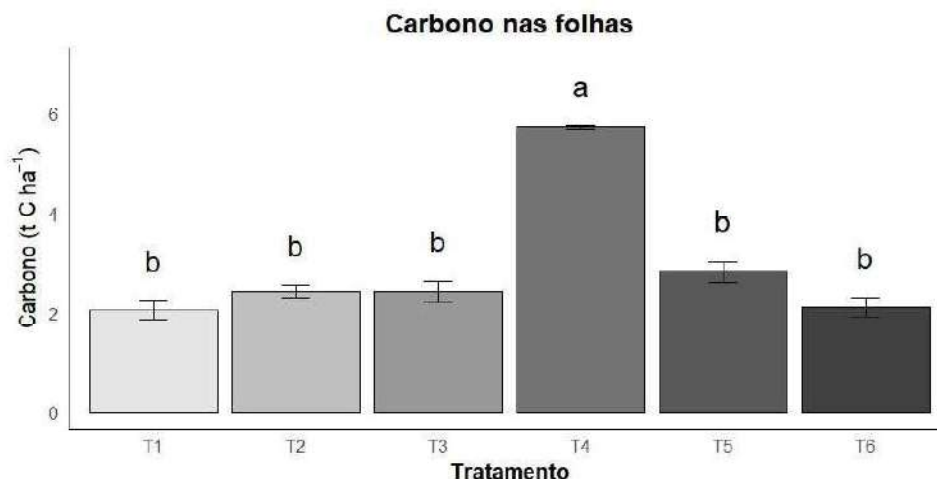


Figura 3. Carbono nas folhas de cafeeiros (t C ha⁻¹). T1: trincha; T2: herbicida residual; T3: herbicida de contato; T4: roçadeira; T5: capina manual; T6: sem capina. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

Quanto ao estoque de carbono nas raízes finas, os valores variaram de 4,99 a 9,87 t ha⁻¹ (tabela 3). O manejo com Trincha (T1) apresentou o maior valor absoluto observado (9,87 t ha⁻¹), seguido pelos tratamentos com Capina manual (T5), com 7,64 t ha⁻¹, herbicida residual (T2) com 6,64 t ha⁻¹, herbicida de contato (T3: 5,97 t ha⁻¹), sem capina (T6: 5,47 t ha⁻¹) e roçadeira (T4: 4,99 t ha⁻¹). Ressalta-se que, devido à limitação operacional, a avaliação foi realizada com uma única planta por tratamento, sendo os valores apresentados de caráter descritivo.

O estoque de carbono nas raízes grossas variou de 8,56 a 16,4 t ha⁻¹ (tabela 3). O maior valor absoluto foi registrado no tratamento com capina manual (T5: 16,4 t ha⁻¹), enquanto os demais tratamentos apresentaram valores inferiores, seguindo a sequência: trincha (T1: 13,93 t ha⁻¹), herbicida de contato (T3: 9,96 t ha⁻¹), sem capina (T6: 9,80 t ha⁻¹), herbicida residual (T2: 9,78 t ha⁻¹) e roçadeira (T4: 9,4 t ha⁻¹). Assim como nas raízes finas, esses resultados devem ser interpretados de forma descritiva, uma vez que não houve repetição experimental para essa variável.

Tabela 3. Valores absolutos do acúmulo de carbono em raízes finas e em raízes grossas de cafeeiros de cada tratamento em toneladas por hectare.

Tratamento	Manejo	Tipo de raiz	Carbono (t ha ⁻¹)
T1	Trincha	Fina	9,87
T2	Herbicida residual	Fina	6,64
T3	Herbicida de contato	Fina	5,97

T4	Roçadeira	Fina	4,99
T5	Capina manual	Fina	7,64
T6	Sem capina	Fina	5,47
T1	Trincha	Grossa	13,93
T2	Herbicida residual	Grossa	9,78
T3	Herbicida de contato	Grossa	9,96
T4	Roçadeira	Grossa	8,56
T5	Capina manual	Grossa	16,42
T6	Sem capina	Grossa	9,80

Resultados foram interpretados de forma descritiva uma vez que não houve repetição experimental para essa variável.

O estoque total de carbono radicular, obtido pelo somatório das raízes finas e grossas (tabela 4), variou de 13,55 a 24,06 t ha⁻¹ entre os manejos avaliados. O maior valor observado foi registrado no tratamento com capina manual (T5: 24,06 t ha⁻¹), seguido pelos tratamentos com trincha (T1: 23,80 t ha⁻¹), herbicida residual (T2: 16,42 t ha⁻¹), herbicida de contato (T3: 15,93 t ha⁻¹), sem capina (T6: 15,27 t ha⁻¹) e roçadeira (T4: 13,55 t ha⁻¹).

Esses resultados de valores absolutos podem indicar uma tendência de maior alocação de carbono no sistema radicular sob capina manual. Ressalta-se, contudo, que a avaliação radicular foi realizada com uma única planta por tratamento, em função das limitações operacionais, de modo que os resultados devem ser interpretados de forma descritiva.

Tabela 4. Valores absolutos do acúmulo de carbono total em raízes (finas + grossas) de cafeeiros em cada tratamento em toneladas por hectare.

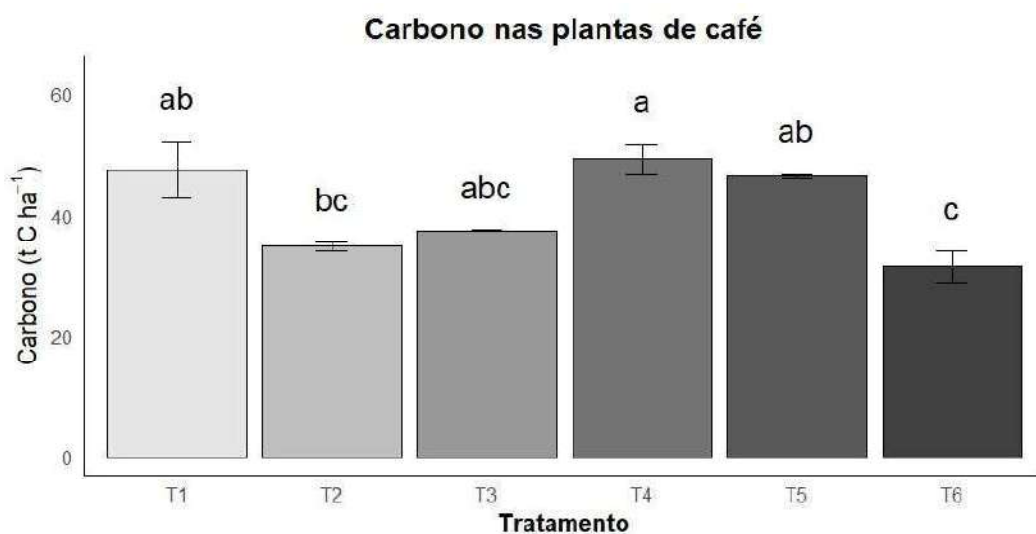
Tratamento	Manejo	Carbono (t ha⁻¹)
T1	Trincha	23,80
T2	Herbicida residual	16,42
T3	Herbicida de contato	15,93
T4	Roçadeira	13,55
T5	Capina manual	24,06
T6	Sem capina	15,27

Resultados foram interpretados de forma descritiva uma vez que não houve repetição experimental para essa variável.

O estoque de carbono total da planta (somatório dos compartimentos aéreos e radiculares) apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os manejos avaliados (Figura 4). Os valores médios variaram de 31,37 a 49,17 t C ha⁻¹ entre os tratamentos.

O tratamento com roçadeira (T4) apresentou o maior valor médio de acúmulo de carbono (49,17 t C ha⁻¹), porém não diferiu estatisticamente dos tratamentos trincha (T1: 47,46 t C ha⁻¹) e capina manual (T5: 46,37 t C ha⁻¹), os quais também se destacaram pelo elevado estoque de carbono total.

Os tratamentos com herbicida de contato (T3: 37,43 t C ha⁻¹) e herbicida residual (T2: 34,69 t C ha⁻¹) apresentaram valores intermediários, sem diferir estatisticamente dos tratamentos com maiores ou menores estoques, evidenciando uma condição de transição entre os sistemas avaliados. Por sua vez, o tratamento sem capina (T6: 31,37 t C ha⁻¹) apresentou o menor valor médio de carbono total, diferindo significativamente apenas do tratamento com maior acúmulo (T4), indicando menor capacidade de estocagem de carbono na planta sob ausência de manejo.



Fi

gura 4. Carbono (t ha⁻¹) da planta inteira de café. T1: trincha; T2: herbicida residual; T3: herbicida de contato; T4: roçadeira; T5: capina manual; T6: sem capina. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

A análise dos estoques de carbono orgânico (Tabela 5) revelou variações ao longo do perfil do solo entre os manejos adotados, evidenciando que a forma de controle das plantas espontâneas na entrelinha do cafeeiro influencia a capacidade de estocagem de carbono no perfil do solo.

Na camada superficial (0–10 cm), não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos ($p > 0,05$). Embora numericamente os tratamentos Sem Capina (T6) e Mata secundária (T7) tenham apresentado valores superiores (34,01 e 31,90 t ha⁻¹, respectivamente), a homogeneidade estatística sugere que a deposição de resíduos recentes na superfície ainda não foi suficiente para diferenciar os sistemas nesta profundidade específica.

O cenário torna-se mais diferenciado na camada de 10–30 cm, onde o T6 (63,29 t ha⁻¹) apresentou o maior acúmulo de carbono, superando significativamente os tratamentos com Trincha (T1), Herbicida Residual (T2) e Capina Manual (T5). O desempenho do T6 nesta profundidade superou numericamente a Mata secundária (T7), sugerindo que a renovação constante do sistema radicular das plantas espontâneas, aliada à ausência de revolvimento ou supressão química, pode promover uma entrada vigorosa de carbono em subsuperfície.

Na camada mais profunda (30–60 cm), os maiores estoques foram mantidos pelo T6 (48,19 t ha⁻¹), T7 (46,07 t ha⁻¹) e T5 (44,07 t ha⁻¹). O tratamento com Herbicida Residual (T2) apresentou o menor valor (29,60 t ha⁻¹), sendo estatisticamente inferior aos demais, o que indica possível efeito negativo da manutenção do solo exposto na preservação do carbono em profundidade.

Ao considerar o Perfil Total (0–60 cm), os tratamentos Sem Capina (T6) e Mata secundária (T7) consolidaram-se como os sistemas mais eficientes no sequestro de carbono, pertencendo ao grupo estatístico superior. O estoque total do T6 (48,50 t ha⁻¹, valor médio ao longo do perfil) demonstra que a coexistência com as plantas espontâneas pode transformar o sistema cafeeiro em um sumidouro de carbono com capacidade comparável à vegetação nativa da região. Os manejos T3 (Herbicida de Contato), T4 (Roçadeira) e T5 (Capina Manual) formaram um grupo intermediário, indicando que, embora permitam algum aporte de biomassa, a periodicidade do controle impede que o solo atinja o potencial máximo de estocagem observado no sistema sem capina.

Por fim, o uso de Herbicida Residual (T2) resultou no menor estoque acumulado de todo o experimento (26,35 t ha⁻¹). A diferença de aproximadamente 22 t ha⁻¹ entre o T6 e o T2 evidencia que o controle químico severo está associado à redução do aporte de carbono e

pode comprometer os serviços ecossistêmicos de mitigação de gases de efeito estufa, resultando em um solo com menor resiliência e fertilidade orgânica.

Tabela 5. Estoque de carbono no solo em cada tratamento (Trat: t ha⁻¹) e em cada profundidade estudada.

Tra t	0–10 cm	10–30 cm	30–60 cm	Perfil Total
T1	23,36 ±2,31a	33,06 ±4,80b	38,55 ±4,58 ab	31,66 ±7,54bc
T2	19,33 ±1,96a	30,13 ±1,54b	29,60 ±11,80 b	26,35 ±8,01c
T3	22,78 ±1,49a	40,03 ±5,71ab	36,82 ±7,07 ab	33,21 ±9,18b
T4	24,46 ±2,32a	44,01 ±3,67ab	34,41 ±0,50 ab	34,29 ±8,74b
T5	23,91 ±1,90a	37,19 ±0,49b	44,07 ±0,57 a	35,06 ±9,19b
T6	34,01 ±3,96a	63,29 ±8,52a	48,19 ±7,08a	48,50 ±13,99a
T7	31,90 ±6,66a	49,14 ±13,93a	46,07 ±6,15a	42,37 ±11,40a

T1: trincha; T2: herbicida residual; T3: herbicida de contato; T4: roçadeira; T5: capina manual; T6: sem capina; T7: Mata secundária (Referência). Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

O estoque de carbono total do sistema cafeeiro (figura 5), considerando o somatório dos compartimentos planta, solo e serapilheira, apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos avaliados ($p < 0,01$). Esse resultado evidencia que o manejo adotado influencia diretamente a capacidade de acúmulo de carbono no sistema como um todo. Os valores médios de carbono total do sistema variaram de 127,10 a 204,63 t C ha⁻¹ entre os tratamentos. O maior acúmulo de carbono foi observado no tratamento sem capina (T6: 204,63 t C ha⁻¹), o qual diferiu significativamente de todos os demais tratamentos, destacando-se como o sistema mais eficiente em termos de estoque de carbono.

O tratamento capina manual (T5: 165,81 t C ha⁻¹) e roçadeira (T4: 164,71 t C ha⁻¹) apresentaram valores intermediários e não diferiram entre si, sendo inferiores ao tratamento de maior acúmulo (T6: sem capina). Esses resultados indicam que esses manejos também promovem condições favoráveis ao armazenamento de carbono no sistema, embora em menor magnitude quando comparados ao T6.

Os tratamentos com trincha (T1: 157,72 t C ha⁻¹) e herbicida de contato (T3: 146,96 t C ha⁻¹) apresentaram valores intermediários e não diferiram estatisticamente tanto dos tratamentos superiores quanto de alguns inferiores, indicando uma resposta moderada em

relação ao acúmulo de carbono. Por outro lado, o tratamento com herbicida residual (T2: 127,10 t C ha⁻¹) apresentou o menor valor de estoque de carbono, diferindo significativamente do tratamento de maior acúmulo (T6), e configurando-se como o sistema menos eficiente na retenção de carbono entre os avaliados.

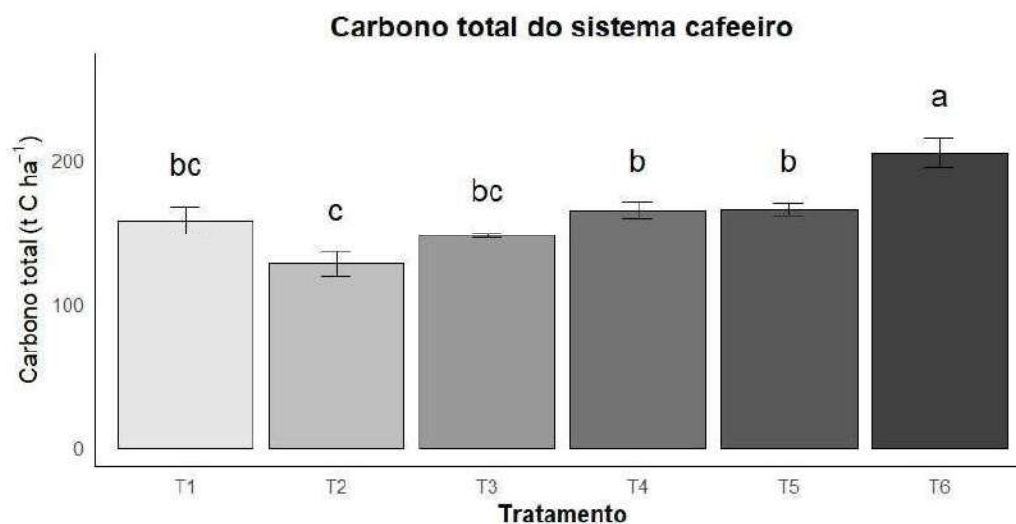


Figura 5. Carbono total do sistema cafeeiro (t ha⁻¹). T1: trincha; T2: herbicida residual; T3: herbicida de contato; T4: roçadeira; T5: capina manual; T6: sem capina. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

A produtividade do cafeeiro em 2023 (figura 6) variou entre 45,95 e 58,27 sacas ha⁻¹ entre os tratamentos avaliados. O tratamento T1 apresentou a maior média produtiva, enquanto T3 apresentou o menor valor médio. Entretanto, não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos ($p \leq 0,05$).

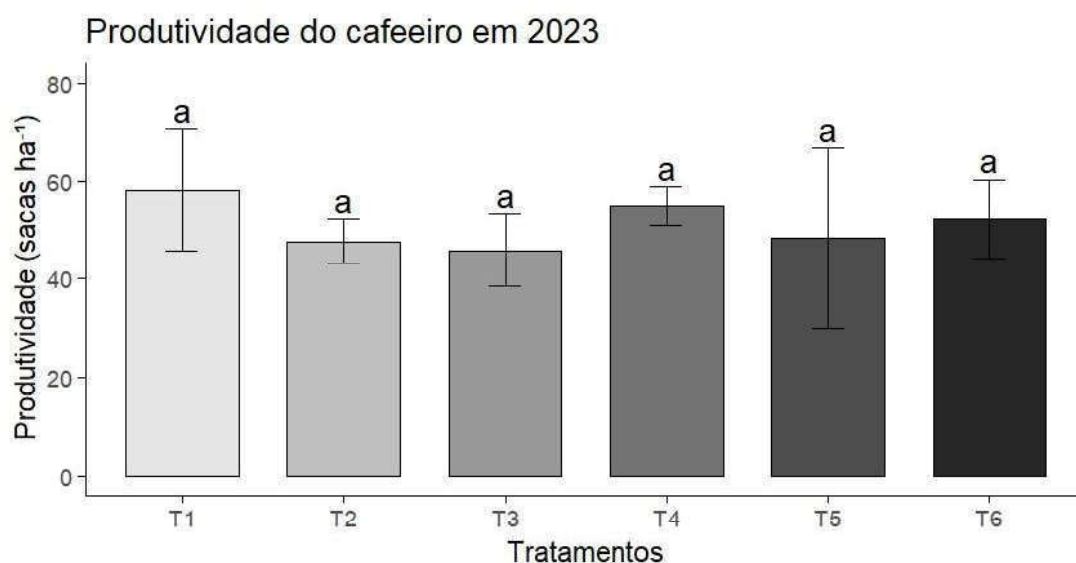


Figura 6. Produtividade do cafeeiro (sacas ha⁻¹). T1: trinchá; T2: herbicida residual; T3: herbicida de contato; T4: roçadeira; T5: capina manual; T6: sem capina. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

5 DISCUSSÃO

Dinâmica da Serapilheira e Cobertura do Solo

A ausência de diferenças estatísticas nos estoques de serapilheira na linha de plantio indica que o cafeeiro, por ser uma cultura perene, mantém aporte constante de biomassa sob a copa, independentemente do manejo das plantas espontâneas na entrelinha. Esse efeito tamponante também pode estar relacionado ao manejo padronizado da lavoura, em que a linha foi mantida limpa em 0,5 m de cada lado em todos os tratamentos.

Segundo Tavares e colaboradores (2020), a deposição de folhas e ramos senescentes pelo cafeeiro atua como uma fonte contínua de material orgânico que estabiliza o microclima da linha. No entanto, é na entrelinha que o manejo se torna determinante. A semelhança observada entre o tratamento Sem Capina (T6) e a Mata secundária (T7) no primeiro semestre demonstra que a manutenção das plantas espontâneas é a estratégia que melhor mimetiza os processos naturais de deposição orgânica (ALCANTÂRA & FERREIRA, 2009; FERREIRA et al. 2021).

Em contrapartida, a redução generalizada de carbono na serapilheira observada no segundo semestre em todos os tratamentos reflete a sazonalidade climática característica da região. O aumento das temperaturas máximas e a redução da pluviosidade aceleram a dessecação da biomassa. Segundo Henrique et al. (2022), a dinâmica de perda de massa da serapilheira é influenciada diretamente pelas condições físico-químicas do ambiente e pela composição do material vegetal.

No caso do manejo com roçadeira (T4), os menores estoques de carbono observados na entrelinha podem estar relacionados à fragmentação da biomassa vegetal promovida pelo corte mecânico. A redução do tamanho das partículas aumenta a área de contato do material orgânico com os microrganismos decompositores, acelerando sua decomposição e reduzindo o tempo de permanência da serapilheira na superfície. Além disso, o tráfego de máquinas pode favorecer a incorporação desse material às camadas superficiais, contribuindo para o menor acúmulo superficial de carbono observado nesse tratamento.

O uso de Herbicidas Residuais (T2) mostra-se crítico; ao impedir a emergência de plantas espontâneas e o consequente aporte de novos resíduos, este manejo interrompe a ciclagem biogeoquímica. A ausência dessa cobertura vegetal priva o sistema de uma proteção essencial contra efeitos ambientais adversos, como erosões, resultando na exposição do solo e na redução drástica dos estoques superficiais de carbono (ALCÂNTARA et al. 2011; ANDRADE & ZAPATA, 2019; HENRIQUE et al. 2022).

Essa vulnerabilidade do sistema sem cobertura vegetal é evidenciada por Gonçalves (2022), ao demonstrar que a ausência de cobertura vegetal reduz a umidade do solo para níveis críticos em comparação a áreas com aporte de biomassa (15,1% quando para solos argilosos, capacidade de campo costuma ficar entre 35% e 45%), uma vez que a vegetação é essencial para reduzir a evaporação e favorecer a infiltração de água no perfil.

Alocação de Carbono na Biomassa do Cafeeiro

Os resultados dos compartimentos aéreos do cafeeiro indicam que a planta responde de forma diferenciada aos estímulos do manejo na entrelinha. Enquanto os ramos ortotrópicos mantiveram relativa estabilidade estrutural, que é fundamental para a integridade física e a sustentação da arquitetura do cafeeiro, os ramos plagiotrópicos e folhas mostraram maior sensibilidade às intervenções.

O melhor desempenho no estoque de carbono em ramos plagiotrópicos sob o manejo com roçadeira (T4), sugere que o corte mecânico periódico reduz a competição imediata por luz, ao mesmo tempo em que mantém os benefícios da cobertura do solo por resíduos (ALCÂNTARA et al., 2015). O aporte contínuo de biomassa na entrelinha pode ter favorecido o vigor vegetativo do cafeeiro, resultando em maiores estoques de carbono nos ramos produtivos (plagiotrópicos).

A maior sensibilidade dos ramos plagiotrópicos e das folhas reforça a elevada vulnerabilidade do cafeeiro à competição. A concorrência por nutrientes com plantas espontâneas pode reduzir em até 50% o teor de macronutrientes e em 41% o crescimento de plantas jovens, evidenciando a importância de um manejo que minimize a pressão de biótipos agressivos e permita que o carbono seja direcionado à fração produtiva da planta (SANTOS et al., 2022).

Os maiores valores observados na Capina Manual (T5) no acúmulo de carbono em raízes finas ($7,6 \text{ t ha}^{-1}$) e grossas ($16,4 \text{ t ha}^{-1}$), totalizando o maior estoque radicular ($24,06 \text{ t ha}^{-1}$), sugerem uma possível resposta adaptativa ao estresse mecânico. Embora a enxada reduza a resistência mecânica na camada superficial (0-5 cm), seu uso frequente pode aumentar a densidade do solo logo abaixo. Associada à poda radicular provocada pela ferramenta, essa condição estimula a renovação da biomassa subterrânea, permitindo à planta compensar perdas e manter a absorção de recursos (ARAUJO-JUNIOR et al. 2023).

Em contraste, o menor resultado no estoque radicular no manejo com roçadeira (T4) ($13,55 \text{ t ha}^{-1}$) pode sugerir efeitos negativos relacionados à compactação. O tráfego de implementos pode elevar a resistência à penetração de raízes a níveis críticos ($2.000\text{-}4.000 \text{ kPa}$) na camada de 10-20 cm, limitando a expansão das raízes e reduzindo a alocação de carbono no sistema radicular (DELGADO 2021; ARAUJO-JUNIOR et al. 2023). Gonçalves (2022) observou valores de resistência mecânica à penetração significativamente superiores no rodado do trator em comparação à entrelinha, reforçando que o peso dos implementos cria impedimentos físicos que limitam a expansão radicular em subsuperfície.

Por sua vez, o menor acúmulo total de carbono nas plantas do sistema Sem Capina (T6) evidencia a relação de compensação entre competição e crescimento do cafeeiro. A elevada densidade de plantas espontâneas intensifica a competição por água e nutrientes, restringindo o desenvolvimento da parte aérea. Alcântara et al. (2015) demonstraram que a presença contínua de plantas espontâneas pode reduzir a biomassa seca aérea em até 42%, o que explica os menores teores de carbono observados nos ramos plagiotrópicos nesse tratamento.

De forma geral, os resultados evidenciam que o manejo da vegetação na entrelinha exerce influência significativa sobre o acúmulo de carbono na planta do cafeeiro. Sistemas que promovem controle adequado da vegetação, como roçadeira, trincha e capina manual, tendem a favorecer o desenvolvimento vegetativo e a alocação de carbono na biomassa total da planta. Esses resultados indicam o papel do manejo como ferramenta estratégica para a construção de sistemas cafeeiros mais produtivos e com maior potencial de acúmulo de carbono.

Estabilização de Carbono no Perfil do Solo

A interação entre os processos de superfície, representados pela serapilheira, e os processos subterrâneos, associados ao sistema radicular, reflete-se nos estoques de carbono no solo. A superioridade do T6 (Sem Capina) na camada de 10-30 cm, superando numericamente a vegetação nativa, é o achado mais relevante deste estudo. Esse fenômeno pode ser atribuído ao ciclo de vida rápido das plantas espontâneas, cujas raízes morrem e se estabilizam diretamente em subsuperfície, criando um reservatório de carbono protegido da oxidação.

Essa dinâmica reforça que o solo é o compartimento central na estratégia de mitigação de mudanças climáticas em cafezais. O solo pode armazenar até 75% do carbono total do sistema em lavouras consorciadas, evidenciando que, embora os processos de superfície (serapilheira) sejam importantes para a proteção térmica, é no perfil edáfico que ocorre a maior estabilização do carbono a longo prazo (ANDRADE & ZAPATA et al. 2019).

A permanência das plantas espontâneas nas entrelinhas do sistema Sem Capina (T6) pode contribuir para a melhoria na estrutura física do solo, minimizando a resistência mecânica do solo à penetração de raízes quando comparado a métodos mecânicos. Isso facilita o aprofundamento do sistema radicular e, conseqüentemente, a deposição de carbono em camadas subsuperficiais, o que corrobora os elevados estoques de carbono no solo observados no T6 deste estudo (ARAUJO-JUNIOR et al. 2023). Entretanto, a elevada competição por água, luz e nutrientes pode comprometer o desenvolvimento produtivo da cultura, embora não tenham sido observadas reduções significativas na produtividade do cafeeiro durante o período avaliado.

Ao analisar o Perfil Total (0-60 cm), fica evidente que o manejo conservacionista (T6) e a referência natural (T7) são os sistemas mais resilientes. A diferença de aproximadamente 22 t ha⁻¹ entre o sistema sem capina e o uso de Herbicida Residual (T2) quantifica o impacto negativo da supressão total da vegetação. Quando convertido em dióxido de carbono equivalente (CO₂e), esse diferencial representa aproximadamente 80,7 t ha⁻¹ de CO₂ potencialmente retidos no sistema, utilizando o fator 3,67 proposto pelo IPCC (2006).

A correlação entre a redução drástica de carbono no T2 e a degradação da estrutura física do solo é validada pela relação direta entre o Carbono Orgânico Total (COT) e a

Densidade do Solo (Ds). Para Latossolos muito argilosos, a perda de COT está ligada ao aumento de Ds. Isso reforça que o esgotamento das frações orgânicas observado no T2 compromete não apenas a química, mas também a estabilidade física do agroecossistema, dificultando a recuperação do sistema a longo prazo (ARAÚJO-JUNIOR et al. 2023).

De acordo com Xavier & Andrade (2025), moléculas herbicidas com ação residual permanecem na camada superficial do solo (cerca de 4 cm), impedindo a emergência e o estabelecimento da vegetação espontânea. A ausência prolongada de cobertura vegetal expõe o solo diretamente à radiação solar e ao impacto das chuvas, reduzindo o aporte de serapilheira e a atividade radicular no sistema. Como consequência, ocorre menor reposição de matéria orgânica e redução das frações orgânicas do solo ao longo do tempo. Como observado anteriormente por Alcântara et al. (2015) em São Sebastião do Paraíso, embora o herbicida de pré-emergência seja eficiente na supressão da competição com o cafeeiro, esse manejo está associado à degradação da estrutura física e química do solo a longo prazo, o que explica os menores estoques de carbono observados no tratamento T2.

Os manejos como a Roçadeira (T4) representam estratégias intermediárias, buscando conciliar produtividade da cultura e conservação do solo, enquanto o controle químico severo degrada o estoque orgânico, comprometendo a fertilidade a longo prazo e os serviços ecossistêmicos de mitigação de gases de efeito estufa. O uso permanente de herbicidas que impedem a emergência de plantas reduz significativamente o teor de matéria orgânica e a atividade biológica do solo devido à falta de aporte vegetal (ALCÂNTARA et al. 2009; ALCÂNTARA et al., 2015).

Ao considerar o carbono total do sistema cafeeiro, incluindo os compartimentos planta, solo e serapilheira, observa-se que o manejo da vegetação espontânea exerce forte influência sobre o potencial de mitigação climática do agroecossistema. A diferença de 77,53 t C ha⁻¹ entre o tratamento Sem Capina (T6) e o Herbicida Residual (T2) representa aproximadamente 284,5 t ha⁻¹ de CO₂ equivalente (CO_{2e}), utilizando o fator de conversão 3,67 proposto pelo IPCC (2006).

De forma integrada, os resultados demonstram que práticas conservacionistas, capazes de manter cobertura vegetal permanente e maior aporte de matéria orgânica, ampliam significativamente a capacidade do sistema cafeeiro em atuar como sumidouro de carbono. Em contraste, sistemas com supressão intensa da vegetação reduzem o potencial de

retenção de carbono do sistema, comprometendo serviços ecossistêmicos associados à qualidade do solo e à mitigação de gases de efeito estufa.

5 CONCLUSÃO

O manejo da vegetação espontânea na entrelinha influenciou a dinâmica e os estoques de carbono no sistema cafeeiro. O tratamento sem capina (T6) apresentou os maiores estoques de carbono no solo e no sistema total, enquanto o manejo com roçadeira (T4) promoveu maior acúmulo de carbono na biomassa aérea do cafeeiro. Em contraste, o uso de herbicida residual (T2) apresentou os menores estoques de carbono na serapilheira e no solo. Não foram observadas diferenças significativas na produtividade do cafeeiro entre os tratamentos no período avaliado. Dessa forma, os resultados indicam que manejos que mantêm cobertura vegetal na entrelinha, associados ao controle mecânico da vegetação, podem representar alternativas mais equilibradas para conciliar acúmulo de carbono e manutenção do desenvolvimento vegetativo do cafeeiro.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, E. N. de et al. Influência de diferentes tipos de manejo de plantas daninhas sobre a produtividade do cafeeiro. 2015.

ALCANTARA, E. N. de; FERREIRA, M. M. Efeito de métodos de controle de plantas daninhas na produção de café durante 30 anos. 2009.

AMORIM, H. C. S. et al. Soil structure and organic carbon dynamics from agroforestry and conventional coffee systems in a clayey Oxisol. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S. l.], v. 397, p. 110042, 2026.

ANDRADE, H. J.; ZAPATA, P. C. Mitigation of climate change of coffee production systems in Cundinamarca, Colombia. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 3, p. e20180126, 2019.

ARAUJO-JUNIOR, C. F. et al. Manejos de plantas invasoras e culturas de coberturas em uma lavoura cafeeira sobre a resistência mecânica a campo de um Latossolo. **Observatório De La Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 12, p. 27926-27948, 2023.

AWAZI, N. P. Climate change mitigation and adaptation in Cameroon through cocoa and coffee-based agroforestry systems. **Discover Forests**, v. 1, n. 1, p. 8, 2025.

COGO, F. D. et al. Estoques de carbono orgânico do solo em cafezais sob diferentes sistemas de controle de plantas invasoras. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 3, p. 1089-1098, 2013.

DELGADO, E. U. A. Culturas de cobertura na supressão de plantas daninhas e atributos físicos do solo cultivado com café. 2021.

FERREIRA, C. C. et al. Cafeicultura: Recuperação de áreas degradadas e uso de práticas agroecológicas no manejo do café em região de montanhas. 2021.

FERREIRA, M. L. et al. Ecological implications of twentieth century reforestation programs for the urban forests of São Paulo, Brazil: a study based on litterfall and nutrient cycling. **Ecological processes**, v. 10, n. 1, p. 27, 2021.

GONÇALVES, A. L. L. Plantas de cobertura na descompactação do solo e controle de plantas daninhas em lavoura cafeeira. 2022.

HENRIQUE, N. S.; MALTONI, K. L.; FARIA, G. A. Litterfall decomposition of coffee shaded with *Tectona grandis* or in full sun. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 2, p. 91-96, 2022.

MA, Y. et al. Global crop production increase by soil organic carbon. **Nature Geoscience**, v. 16, n. 12, p. 1159-1165, 2023.

MARTINEZ, H. E. P. et al. Agronomic practices toward coffee sustainability. A review. **Scientia Agrícola**, v. 81, p. e20220277, 2023.

MESQUITA, C. M. de et al. Manual do café: manejo de cafezais em produção. Belo Horizonte: Emater-MG, p. 1-52, 2016.

RIGAL, C.; XU, J.; VAAST, P. Young shade trees improve soil quality in intensively managed coffee systems recently converted to agroforestry in Yunnan Province, China. **Plant and soil**, v. 453, p. 119-137, 2020.

SALGADO VERAMENDI, N. et al. Carbon Storage in Coffee Agroforestry Systems: Role of Native and Introduced Shade Trees in the Central Peruvian Amazon. **Agriculture**, v. 15, n. 13, p. 1415, 2025.

SANTOS, E. B. S.; JUNIOR, K. S. F.; BRIGANTE, G. P. Avaliação de herbicidas no controle de plantas daninhas no cafeeiro. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 16, p. e519111638529-e519111638529, 2022.

SEGURA, M.; KANNINEN, M.; SUÁREZ, D. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. **Agroforestry Systems**, [S. l.], v. 68, n. 2, p. 143-150, 2006.

SOLOS, EMBRAPA et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro**, v. 3, 2013.

TAVARES, P. D. et al. Carbon stock in different compartments of coffee agroforestry systems. **Journal of Agricultural Science**, [S. l.], v. 12, n. 4, p. 111-121, 2020.

TEIXEIRA, H. M. et al. 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 & Environment**, v. 305, p. 107171, 2021.

TEIXEIRA, P. C. et al. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p. 2017.

VALLEJOS-TORRES, G. et al. Carbon reserves in coffee agroforestry in the Peruvian Amazon. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1410418, 2024.

XAVIER, C. R.; ANDRADE, P. P. AVALIAÇÃO DE DIFERENTES DOSES DE GLIFOSATO ASSOCIADO A OUTROS HERBICIDAS NO CONTROLE DE PLANTAS

DANINHAS NO CAFEIRO. **Revista Agroveterinária do Sul de Minas-ISSN: 2674-9661**, v. 7, n. 2, p. 1-19, 2025.

Agradecimentos: Esta pesquisa contou com o apoio financeiro da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), do Consórcio Pesquisa Café, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia do Café (INCT Café).

Agradecemos a todos que gentilmente contribuíram direta e indiretamente para este trabalho, bem como à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e à EPAMIG. Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas de estudo.

Artigo 3 - Redigido conforme norma do periódico científico	
Título do artigo:	Weed management influences the accumulation of organic matter in the soil and productivity in coffee farming
Autores:	Indira Pereira de Oliveira Andreisa Fabri Lima Leônidas Canuto Santos André Dominghetti Ferreira Juliana Costa de Rezende Abrahão Elifas Nunes de Alcântara Vinícius Teixeira Andrade Francislei Vitti Raposo Regis Pereira Venturin Gladyston Rodrigues Carvalho
Periódico:	New Zealand Journal of Crop & Horticultural Science
ISSN	1175-8783
DOI	10.1002/nzc2.70159

ARTIGO 3 – Weed management influences the accumulation of organic matter in the soil and productivity in coffee farming

Indira Pereira de Oliveira^{a*}, Andreisa Fabri Lima^b, Leônidas Canuto Santos^c, André Dominghetti Ferreira^d, Juliana Costa de Rezende Abrahão^e, Elifas Nunes de Alcântara^f, Vinícius Teixeira Andrade^g, Francislei Vitti Raposo^h, Regis Pereira Venturinⁱ, Gladyston Rodrigues Carvalho^j

^{a*}*Agricultural Department, Federal University of Lavras- UFLA, Lavras, Brazil; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0105-505X>, *ind_pereira@outlook.com;* ^e*Agricultural Research Company of Minas Gerais- EPAMIG, Lavras, Brazil; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6537-0756>, andreisaflima@gmail.com;* ^c*Soil Science Department, Federal University of Lavras- UFLA, Lavras, Brazil, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0385-4736>, leonidas.santos2@estudante.ufla.br;* ^d*Brazilian Agricultural Research Corporation- EMBRAPA, Lavras, Brazil, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6512-4923>, andre.dominghetti@embrapa.br;* ^e*Agricultural Research Company of Minas Gerais- EPAMIG, Lavras, Brazil, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6026-7634>, julianacosta@epamig.br;* ^f*Agricultural Research Company of Minas Gerais- EPAMIG, Lavras, Brazil; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6986-1042>, elifas@epamig.br;* ^g*Agricultural Research Company of Minas Gerais- EPAMIG, Lavras, Brazil, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0011-2788>, vinicius.andrade@epamig.com;* ^h*Coffee Research Consortium, Lavras, Brazil, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8331-5574>, fvraposo@hotmail.com;* ⁱ*Agricultural Research Company of Minas Gerais- EPAMIG, Lavras, Brazil, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2309-4367>, regis@epamig.br;* ^j*Agricultural Research Company of Minas Gerais- EPAMIG, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4466-674X>, grodriguescarvalho@gmail.com.*

Weed management influences the accumulation of organic matter in the soil and productivity in coffee farming

Abstract

The management of weeds can influence organic matter (OM) and organic carbon (OC) levels, impacting the productivity and sustainability of coffee plantations. This study aimed to evaluate OM and OC levels in coffee soils under different weed management practices and their influence on coffee tree physiology and productivity. The experiment featured six treatments (without weeding, manual weeding, brushcutter, trenching, contact herbicide, and pre-emergent herbicide) and a control. Soil samples were collected at three depths (0-10, 10-30, and 30-60 cm) for OM, OC, and density analysis. Additionally, coffee productivity was measured over four harvests (2020–2023), while gas exchange parameters were evaluated during the final year of the study. Weed management using pre-emergent herbicide (PEH) initially resulted in higher productivity in the 2020 harvest; however, no significant differences in yield were observed among treatments in the following three years. Data showed that the continuous use of PEH, followed by contact herbicide (CH) and manual weeding (MW), most negatively impacted soil properties, as these methods eliminate the vegetation cover that protects organic matter and soil structure. This led to lower soil quality over the four-year study, evidenced by significant reductions in OM and OC and increased soil bulk density. The principal component analysis highlighted the strong correlation between water use efficiency and soil OM and OC levels. Therefore, management practices that preserve vegetation cover are essential to promote environmental conservation and sustainability of the production system.

Keywords: Soil quality; Gas exchange; Water use efficiency; Organic carbon, Productivity; *Coffea arabica* L.

Introduction

Coffee farming is one of the pillars of Brazil's economic development. It presents diversified production systems that have transformed the country into the world's largest producer and exporter, with over 55 million bags produced in 2023, reflecting a growth of 8.2% compared

to the previous year (CONAB, 2024). In a territory with a wide possibility of management for production, it is necessary to know the standards and technological information capable of leveraging productivity and maintaining sustainability, considering the current need to reduce the environmental impacts caused by agriculture, especially regarding the increase in organic matter and carbon in the soil, which, as soil fractions, act as the main carbon reservoir of the planet (GEORGIU et al., 2022).

The proper management of weeds in coffee crops directly impacts the accumulation of organic matter and organic carbon in the production system. It is essential for the sustainability and productivity of Brazilian agriculture. Effective management techniques include mechanical practices, such as manual weeding and the use of weeding equipment, selective herbicides, and preventive strategies, such as mulching and crop rotation. These practices help reduce competition for nutrients, water, and sunlight, promoting a healthy growing environment for coffee plants. In coffee field management, the lack of adequate weed control can result in loss of vigor, reduced growth, and, consequently, decreased productivity and longevity of the plantation (MESQUITA et al., 2016).

Historically, weed plants were seen only as harmful to coffee cultivation, with efforts concentrated on their eradication. However, it is understood that the presence of certain vegetation species associated with coffee culture offers essential ecosystem services, such as regulation of soil temperature and humidity, nutrient cycling, and increased accumulation of organic matter (OM), including soil organic carbon (OC), improving soil fertility (COGO et al., 2013; TEIXEIRA et al., 2021). Higher levels of OM in the soil reduce the need to apply chemical inputs, reducing erosion and loss of available nutrients by leaching and allowing a richer microbiota that acts in nutrient cycling between plants and the environment (RIGAL et al., 2020; MARTINEZ et al., 2023). Likewise, OC is crucial for soil quality, directly influencing its physical, chemical, and biological properties. Receiving increasing attention as

a vital indicator of environmental health and fertility, soil OC plays a crucial role in maintaining biological productivity, water quality, climate balance, and production (GEORGIOU et al., 2022).

Different land use systems can affect soil OM and OC levels (MA et al., 2023). Understanding this dynamic and its impact on the ecosystem is essential for biodiversity conservation and promoting sustainable agricultural practices (COGO et al., 2013). Thus, this study aimed to evaluate the OM and OC contents of the soil and its density in relation to photosynthetic parameters and the productivity of *Coffea arabica* L. under different management practices. This understanding will allow the development of more sustainable and effective management practices for coffee farming.

Material and methods

Characterization of the experimental area

The study was carried out in the Experimental Field of the Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado de Minas Gerais (EPAMIG), located in São Sebastião do Paraíso, MG, at coordinates 46°55' W and 20°55' S. The original vegetation consisted of a semi-deciduous seasonal forest, in transition to Brazilian Cerrado, with an average slope of 8%. The climate in the area is classified as humid tropical, with an average annual temperature of 20.8 °C and an average annual precipitation of 1,470 mm (ALCÂNTARA, 2015). The soil was identified as dystroferric Red Oxisol (SOLOS EMBRAPA, 2013), with clayey texture (200, 230, and 570 g kg⁻¹ of sand, silt, and clay, respectively), developed on the basalt of the Serra Geral formation.

The experimental area was originally established in 1975 with the cultivar Catuai Vermelho IAC 99. Following frost damage, the area was replanted in 2006 using the cultivar Paraíso MG H 419-1, with a spacing of 4.0 m between rows and 0.7 m between plants. The current study's evaluations were conducted over a four-year period, from 2020 to 2023, and

included a native forest area (FA) used as a reference is a fragment located within the same geographical complex of the farm, immediately adjacent to the experimental coffee plantation.

The weed management treatments consisted of: without weeding (WW), allowing free weed growth; manual weeding (MW), performed with a hoe; brushcutter (BC), a mechanical mowing process that cuts vegetation 5–10 cm above the ground; and trenching (TR), which utilizes a tractor-mounted flail mower to finely shred biomass and crop residues into a surface mulch layer. Chemical control included a contact herbicide (CH) using 0.72 kg ha⁻¹ of glyphosate and a pre-emergent herbicide (PEH) using 0.72 kg ha⁻¹ of oxyfluorfen.

All management practices were standardized and performed whenever the weed community reached an average height of 30–35 cm, resulting in approximately four interventions per year to ensure consistent competition levels across treatments. These interventions were primarily conducted from November to April, precisely coinciding with the most critical coffee phenological stages, including flowering, fruit expansion, and fruit-filling. In contrast, the pre-emergent treatment (PEH) was applied only once a year, immediately after harvest during the physiological rest period, to ensure residual control throughout the early growth cycle.

The experimental design adopted was in randomized blocks, with three replicates and six treatments. Each plot consisted of three roads, with the different treatments applied in the central roads (between the planting rows). Mechanized weed control operations were conducted at a distance of 80 cm from the coffee tree stems. The number of operations during the year varied according to the method performed whenever weed plants covered 90% of the area between the planting rows.

Soil sampling, collection, and analysis

Soil sampling was conducted in 2023 using a randomized block design with three replicates (blocks) per treatment. For soil bulk density (SD), a total of 63 undeformed samples (7

treatments $\times$ 3 blocks $\times$ 3 depths) were collected from the center of the inter-rows. This location was selected for SD analysis as it reflects the direct impact of weed management and machinery traffic on soil structure.

The samples for SD were collected in 2023 using an Uhland sampler (1950) in a 100 cm³ metal cylinder at three depths (0-10 cm, 10-30 cm, and 30-60 cm) to obtain soil bulk density (SD) in each treatment, using an adjacent native forest area as a reference. The soil collected in the cylinders remained in an oven set at 105 °C for at least 48 hours until complete drying, followed by weighing to calculate the density of the soil according to Oliveira (1979):

$$SD = Ma / V \quad (1)$$

Where: SD – soil bulk density, in kg.dm⁻³ (equivalent to g.cm⁻³). Ma - mass of dry soil sample at 105 °C until reaching constant weight, in g V - cylinder volume, in cm³.

For organic carbon (OC) analysis and soil characterization, 126 deformed samples were collected (7 treatments $\times$ 3 blocks $\times$ 3 depths $\times$ 2 positions), covering both the rows (under the canopy) and the inter-rows at the same depths (0-10 cm, 10-30 cm, and 30-60 cm). The row sampling was chosen to represent the area with minimal mechanical disturbance, while the inter-row represented the area directly affected by the management practices. OC was determined by wet oxidation in Na₂Cr₂O₇ 0.8 mol L⁻¹. OM was determined by the colorimetric method, as described in the Chemical Analysis Manual for Soils, Plants, and Fertilizers (EMBRAPA, 2009).

Gas exchange and productivity analyses

The measurements were made in March 2023, during leaf bud formation and fruit graining, and in December 2023, during flowering and bud formation. The collections were performed on days of full sun, between 8:00 and 12:00, on healthy and completely expanded leaves of the middle third of the plant. The infrared gas exchange analyzer (IRGA-LICOR 6400-XT) was used to evaluate the assimilation of CO₂ (A, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), transpiration (E, mmol m^{-2}

s^{-1}), and stomatal conductance (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). The water use efficiency (WUE) of the coffee tree under different weed management was calculated by the A/E ratio.

The production of each treatment was measured in liters of fruit harvested in the harvests of 2020, 2021, 2022, and 2023, carried out between May and July of each year, and later converted into bags of 60 kg of coffee processed per hectare. The productivity estimate was calculated from a two-liter sample of coffee harvested from each plot, which was packed into plastic nets and kept for drying in the yard until the beans reached a water content of approximately 11%. Subsequently, the samples were processed and weighed.

Statistical analysis

The data were subjected to analyses of variance with a significance level of 5%, followed by Duncan's test to compare the means. The mean values of the evaluated variables were used for canonical dimension analysis to identify the most relevant variables contributing to water use efficiency and productivity under different weed management treatments. The data were standardized (mean = 0 and variance = 1) before conducting the analysis. Canonical dimensions were used to group variables that explained the variability in soil organic matter, soil bulk density, and plant water use efficiency. Statistical analyses were performed using the Genes and R Development Core Team software, 2024.

Results

The accumulation of organic matter (OM) and organic carbon (OC) in the rows and inter-rows of coffee trees varied between 1% and 4% between the different treatments. Compared with the forest soil (FA), the treatments studied in the coffee tree cultivation row showed no differences, with the highest values of OM and OC found in FA, with values around 3.63 and 2.1%, respectively. The treatment with continuous use of pre-emergent herbicide (PEH) presented the lowest levels, with 1.58% of OM and 0.91% of OC, while the other treatments were equal (Figure 1).

In the inter-row, the results in OM and OC are lower when managing weed plants with agricultural tools or herbicides, compared to the treatments with FA (3.63% and 2.10% of OM and OC), with emphasis on the continuous use of pre-emerging herbicide (PEH), which presented levels of 2.48% and 1.24% in the inter-row. The only weed management presenting similar results to FA was the treatment without weeding (WW), with values of 3.83% and 2.22% for OM and OC, respectively (Figure 1).

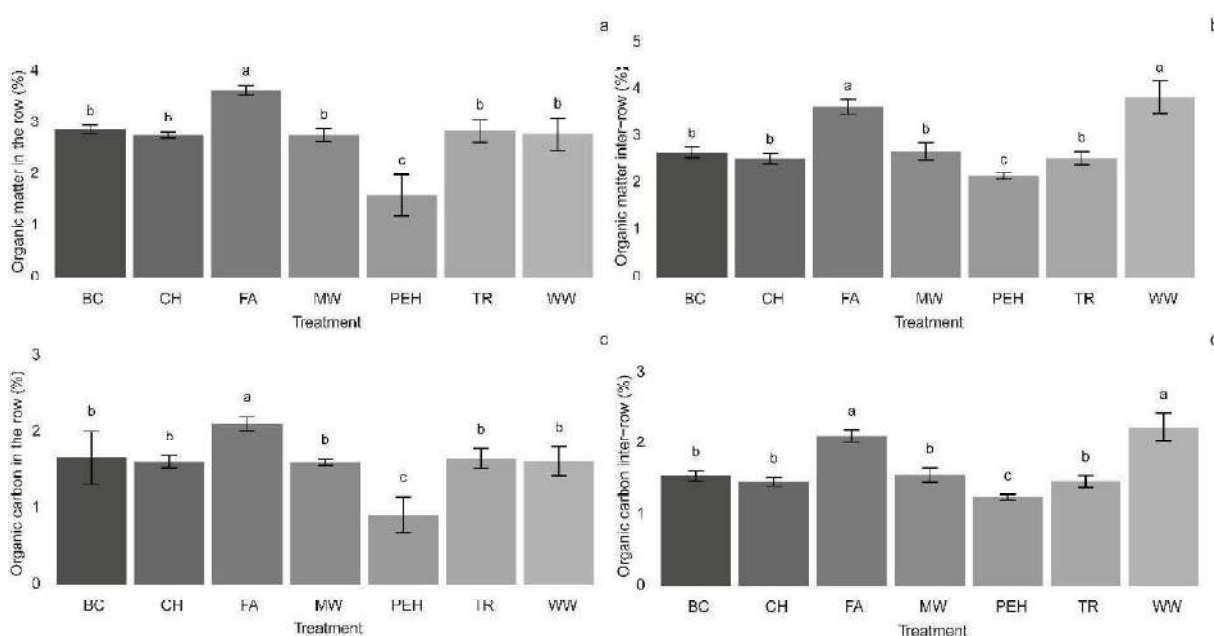


Figure 1. Percentage of organic matter (OM) and organic carbon (OC) of the soil in the rows (R) and inter-rows (IR), according to the following management practices: pre-emergent herbicide (PEH), without weeding (WW), trenching (TR), contact herbicide (CH), brushcutter (BC), manual weeding (MW), and forest soil (FA). Means followed by the same letter are equal compared by the Duncan test at 5% probability. A- Organic matter in the coffee tree row (OMR, %); B- Organic matter in the coffee tree inter-row (OMIR, %); C- Organic carbon in the row (OCR, %); D- Organic carbon in the inter-row (OCIR, %).

The treatment with continuous use of pre-emergent herbicide (PEH) presented the highest total soil density, 1.267 kg.dm^{-3} , and 1.390 kg.dm^{-3} density in the 0-10 cm layer (Figure 2A and 2D). This treatment also resulted in the formation of superficial crusts in the 0-10 cm layer compared to the forest soil (Figure 2A). Other managements presented

densities similar to HR at a depth of 0-10 cm: without weeding (WW) with 1.223 kg.dm⁻³, trenching (TR) with 1.237 kg.dm⁻³, contact herbicide (CH) with 1.320 kg.dm⁻³, brushcutter (BC) with 1.310 kg.dm⁻³, and manual weeding (MW) with 1.257 kg.dm⁻³.

At the depths of 10-30 cm, the treatments without weeding (WW), contact herbicide (CH), and brushcutter (BC) presented the highest densities, with 1.280 kg.dm⁻³, 1.297 kg.dm⁻³, and 1.293 kg.dm⁻³, respectively, while the forest soil presented the lowest density, with 1.153 kg.dm⁻³ (Figure 2B). For the total density, the treatment with pre-emergent herbicide (PEH) showed the highest density, with 1.267 kg.dm⁻³, while the forest soil (FA) presented the lowest density, with 1.140 kg.dm⁻³. The treatment with trenching (TR) presented a total density similar to that of the forest soil. The treatments which include the weed plants (WW and MW), trenching (TR), grazing (BC), and contact herbicide (CH) showed slightly lower total densities compared to the treatment with PEH, with values of 1.197 kg.dm⁻³, 1.233 kg.dm⁻³, and 1.240 kg.dm⁻³, respectively (Figure 2D).

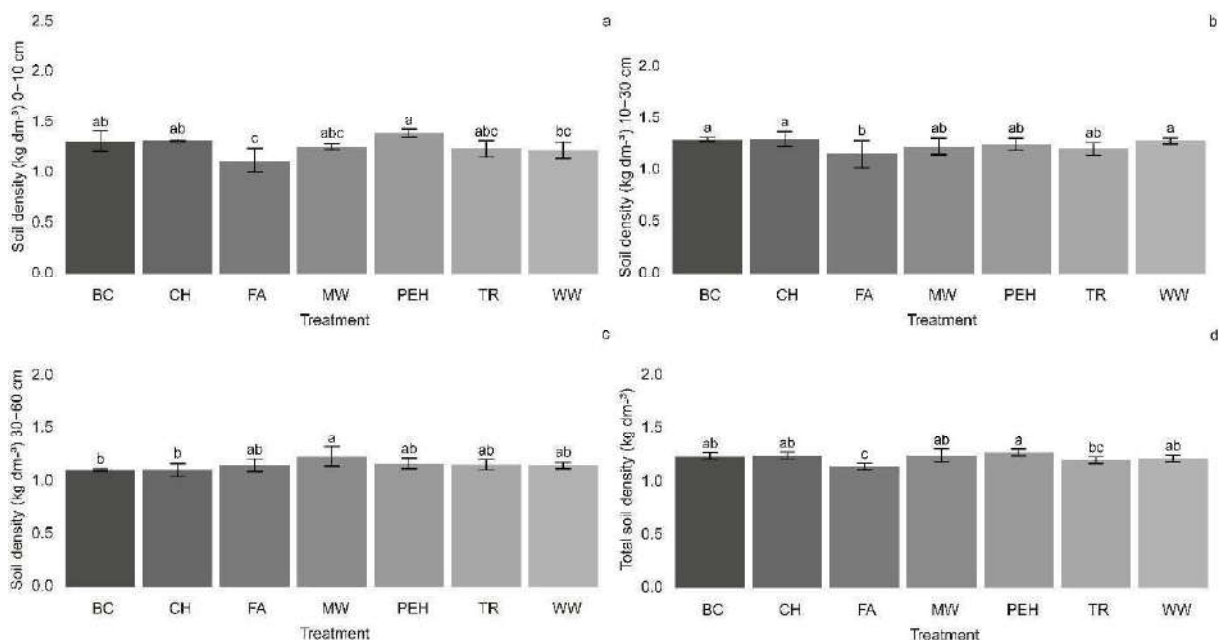


Figure 2. Soil bulk density (kg dm⁻³) at different depths (0-10 cm, 10-30 cm, and 30-60 cm) in the coffee crop, depending on the following management practices: pre-emergent herbicide (PEH), without weeding (WW), trenching (TR), contact herbicide (CH), brushcutter (BC), and manual weeding (MW). The values represent the

soil compaction along the analyzed profile. Means followed by the same letter are equal compared by the Duncan test at 5% probability.

The figure 3 presents the photosynthetic parameters measured in March and December 2023 for different management methods of weed plants in the inter-rows. The treatments did not significantly affect CO₂ assimilation, which varied between 4 and 6 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, indicating that the different treatments did not alter the photosynthetic capacity of coffee plants. Likewise, the other parameters evaluated — stomatal conductance (g_s), transpiration (E), and internal CO₂ concentration (C_i) — also showed no significant variations in response to the treatments (Figure 3 A, B, C, D).

The treatment with contact herbicide (CH), trenching (TR), and brushcutter (BC) did not affect coffee plant growth and maintained photosynthetic capacity within the expected values. The treatment with pre-emergent herbicide (PEH) showed the highest stomatal conductance (g_s), with a value of 0.084 $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, and the highest internal concentration of CO₂ (C_i) of 274.652 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. However, it also showed the highest transpiration rate (E), 1.597 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, and the lowest water use efficiency (WUE), 4.313.

The highest water use efficiency values were observed in the treatments without weeding (WW) and with brushcutter (BC), with values of 6.023 and 5.692, respectively. The treatments with trench (TR), contact herbicide (CH), and manual weeding (MW) showed similar efficiencies, with values of 5.109, 4.911, and 4.778, respectively. These results indicate that managing weed plants did not significantly impact the photosynthetic capacity of coffee plants but affected the water use efficiency, especially under the treatment with pre-emergent herbicide (PEH), which showed greater water loss and lower efficiency.

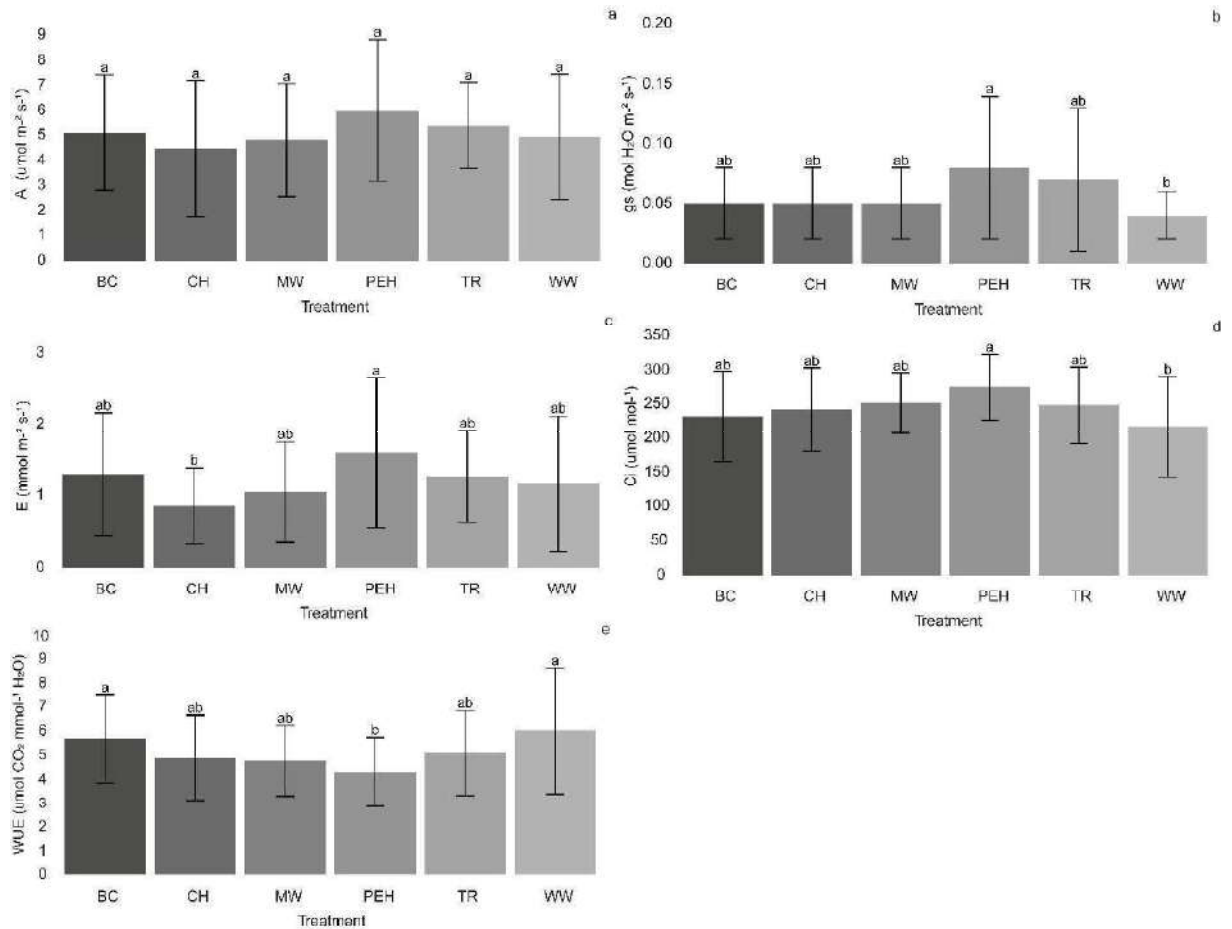


Figure 3. Photosynthetic parameters (CO_2 assimilation (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), stomatal conductance (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), transpiration (E , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), internal CO_2 concentration (C_i , $\mu\text{mol mol}^{-1}$), and water use efficiency (WUE , $\mu\text{mol CO}_2 \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$) measured in March and December 2023 for different management methods of weed plants in the inter-rows. Means followed by the same letter in the column belong to the same comparison group at 5% probability by Duncan's test.

The productivity of coffee trees varied significantly between the 2021 and 2022 harvests, with a slight recovery in the 2023 harvest, as shown in Figure 4. The differences in productivity were more evident in the 2020 harvest, where treatments with pre-emerging herbicide (PEH- 84.7 bags. ha^{-1}), contact herbicide (CH- 78.6 bags. ha^{-1}), brushcutter (BC- 90.0 bags. ha^{-1}), and manual weeding (MW- 84.6 bags. ha^{-1}) presented the highest productivities in bags processed per hectare. Thus, treatments that kept the inter-rows clean showed higher productivity, possibly due to less competition for resources between weed plants and the coffee tree.

In subsequent years, the different management of weeds did not significantly affect the productivity of coffee trees. The trench treatment obtained the lowest productivity in bags of processed coffee per hectare, with 63.4 bags. ha⁻¹, which did not differ significantly from the treatment without weeding, which presented 68.3 bags. ha⁻¹ (Figure 4).

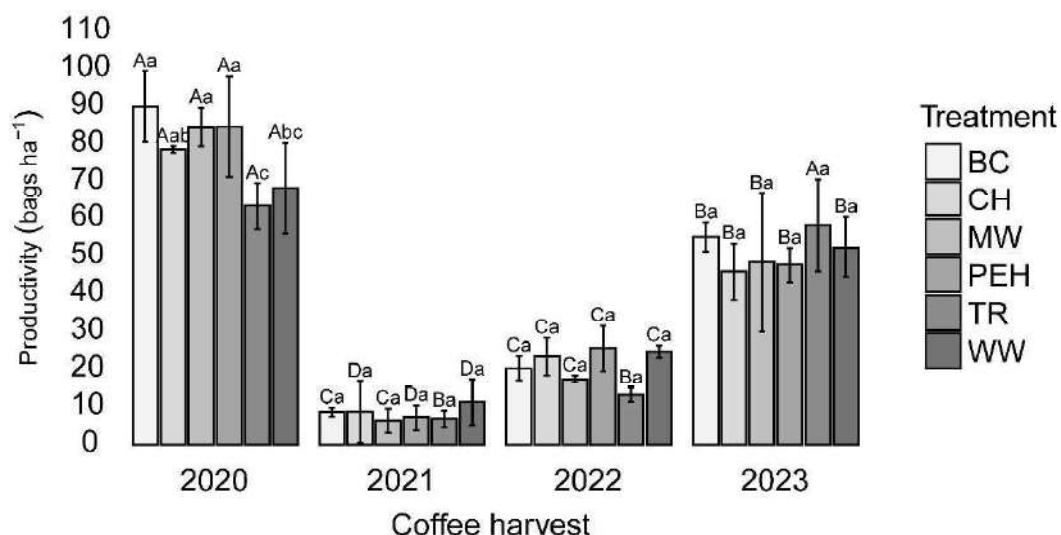


Figure 4. Mean values of coffee productivity (60 kg bags. ha⁻¹) under different weed plant control management. Means in the same bar with equal uppercase letters do not differ between harvests; means in the same bar with equal lowercase letters do not differ between treatments, by the Duncan test at 5% probability. PEH- pre-emergent herbicide; WW- without weeding; TR - trench; CH - contact herbicide; BC - brushcutter; MW - manual weeding.

Principal Component Analysis (Figure 5) revealed that the most relevant variables were water use efficiency (WUE), soil organic matter (OMIR), soil organic carbon (OCIR), residual organic matter (OMR), and residual organic carbon (OCR). These variables showed a strong correlation with plant water use efficiency, demonstrating a high correlation with canonical dimension 1. The meta-analysis conducted by Mbava et al. (2020) revealed a significant positive correlation between water use efficiency (WUE) and soil organic carbon content ($r = 0.86$). In canonical dimension 2, the most important variables were productivity, soil bulk density at 10-30 cm depth, and density at 30-60 cm.

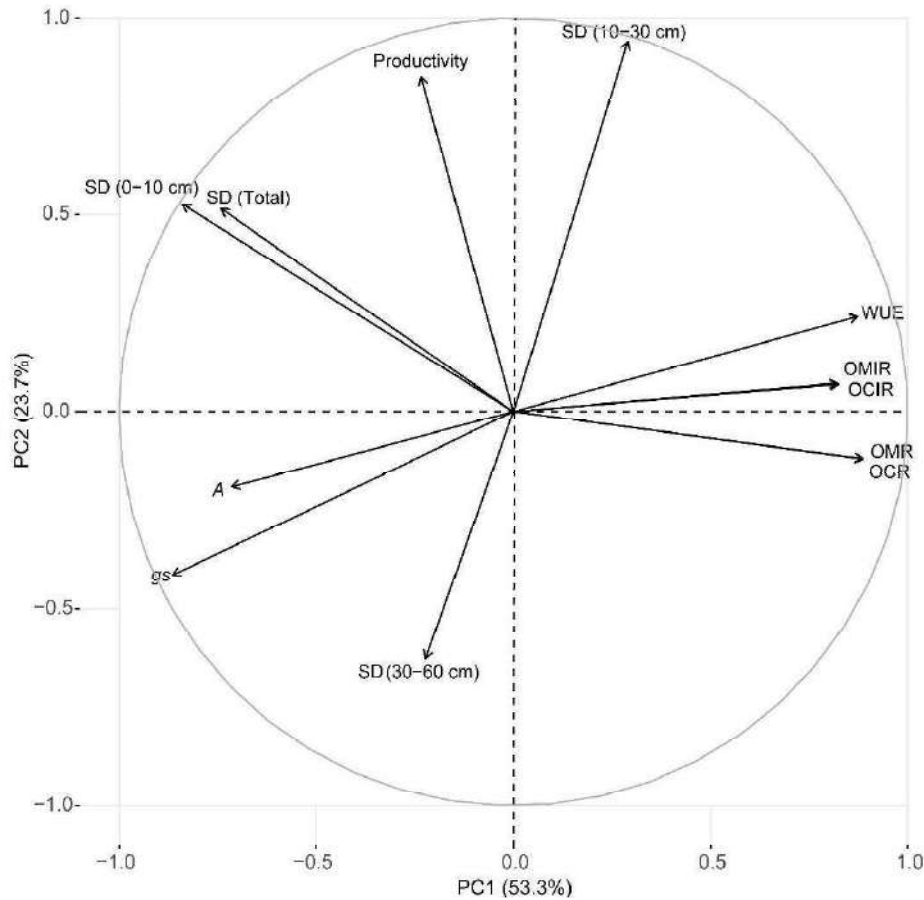


Figure 5. Principal Component Analysis (PCA) for coffee plants submitted to different weed management. The PCAs (PCA1 and PCA2) represent 53.3% and 23.7% of the total data variation. WUE - Water use efficiency; OMIR - Organic matter in the inter-row; OMR- Organic matter in the row; OCIR- Organic carbon in the inter-row; OCR- Organic carbon in the row; SD– soil bulk density (depth 0-10, 10-30, 30-60 and total); A (CO_2 assimilation, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); g_s (stomatal conductance, $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Discussion

The results demonstrate a significant variation in the accumulation of organic matter and organic carbon between the different weed management treatments in the rows and inter-rows of coffee trees. The treatment with continuous use of pre-emergent herbicide (PEH) presented the lowest levels of OM and OC, with 1.58% and 2.48% of OM and 0.91% and 1.24% of OC in the row and inter-row, respectively. These results are consistent with previous studies that suggest that the continuous application of herbicides can lead to a reduction in soil OM and

OC levels due to the negative impact on microbial biodiversity and organic matter degradation in this type of management (ZHAO et al., 2018; ANWAR et al., 2021).

The observation that treatments that preserve weeds, such as without weeding and forest control, showed better results in OM and OC which reinforces the importance of plant material for soil quality. Organic matter is crucial in maintaining soil quality, contributing to water retention and nutrient availability, which is especially important during the seedling establishment phase and throughout the coffee production cycle (ANWAR et al., 2021; FONTES et al., 2022). The presence of OM in exposed soil also helps mitigate the effect of high temperature and excessive water loss, which can impair plant growth.

The findings in this study are consistent with those of Martins et al. (2015), who observed a 26% increase in organic carbon content in treatments that maintained weeds and associated plants compared to methods that used herbicides and mechanized techniques. These data suggest that maintaining vegetation, even when considered invasive, can significantly improve the quality of OM in the soil, unlike intensive control methods that reduce vegetation cover and, consequently, organic matter.

In a long-term study on soil OC accumulation conducted over 63 years, the comparison between soil without vegetation cover and soil cultivated with green manure (intercropped plants) showed a slight increase in OC concentrations in the first 10 to 15 years of the experiment, followed by a period in which OC concentrations remained relatively stable, and a subsequent slight decline. In contrast, OC concentrations decreased steadily over time in the soil treatment without vegetation cover (MEURER et al., 2020).

In addition to improving the soil's biological, chemical, and physical properties, the presence of OM also assists in reducing the germination of positively photoblastic seeds of unwanted plants. This contributes to a more sustainable control of weed species, as demonstrated by the allelopathic effects observed in previous studies (FONTES et al., 2022).

Martins et al. (2015) also found that plots covered with *Mucuna deeringiana* significantly reduced weed density, demonstrating the additional benefits of vegetation cover for managing weed plants.

Our results also reveal significant variations in soil bulk density between different weed management treatments, demonstrating the impact of management practices on soil compaction. The treatment with pre-emergent herbicide (PEH) showed the highest total density of the soil and in the surface layer of 0-10 cm, with values of 1.267 kg.dm⁻³ and 1.390 kg.dm⁻³, respectively. The formation of superficial crusts associated with this treatment suggests a more pronounced compaction in this layer. These results corroborate studies that indicate that the intensive use of herbicides can lead to increased soil bulk density and crust formation due to the lack of vegetation cover and the impact of mechanized operations (ZHAO et al., 2018).

The results indicate that managing weed plants in the inter-rows did not significantly influence the assimilation of CO₂ by coffee plants, which ranged from 4 to 6 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ in both evaluation periods. These values are within the range commonly observed for *Coffea arabica*, ranging from 4 to 8 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ (De Oliveira et al., 2022).

Even with differences in management practices, there was no significant variation in photosynthetic parameters such as stomatal conductance (*gs*), internal CO₂ concentration (*Ci*), and transpiration (*E*) between treatments. The treatment with pre-emergent herbicide (PEH) demonstrated the lowest water use efficiency. In contrast, no-weeding (WW) and brushcutter (BC) treatments showed the highest water use efficiencies, indicating that biomass or lower resource competition may benefit plant water efficiency. The treatments with trench (TR), contact herbicide (CH), and manual weeding (MW) also maintained relatively high water use efficiency values, similar to those of the WW and BC treatments. The presence of weed plants as biomass deposited after management seems to have reduced soil temperature and decreased

evaporation, which may have helped maintain water use efficiency and minimized competition for resources. Therefore, the results suggest that, although weed management does not significantly affect CO₂ assimilation, management practices may influence water use efficiency, with implications for coffee crop productivity. It is essential to consider these effects when choosing management strategies to optimize coffee crops' production and water efficiency.

The physiological behaviour of plants is crucial to understanding coffee tree productivity, especially in the face of recent climatic adversities. The differences in productivity observed between the harvests can be attributed to the biennial nature of productivity and climatic factors, such as the lack of rains and the frosts that occurred during the 2021 and 2022 harvests. Productivity, which was high in 2020, fell significantly in 2021 and 2022, with a slight recovery in 2023.

Managing weed plants that kept the inter-rows clean, such as using herbicides and brushcutter, demonstrated higher productivity in 2020. In subsequent years, the different management of weeds did not significantly influence productivity. The lack of significant differences can be explained by the ongoing competition between the coffee tree and weed plants, which may have likewise affected all treatments. The results suggest that, despite the differences observed in 2020, the efficiency of management methods may be limited by persistent competition for resources, regardless of the type of management applied. However, it is also clear that such potential differences in productivity do not occur solely due to the control of weed plants (ZISKA, 2020).

The principal component analysis demonstrated the relevance of variables related to soil organic matter and organic carbon for plant water-use efficiency. The strong correlations observed between water use efficiency (WUE) and soil organic matter and organic carbon contents indicate that the presence of organic matter is crucial in improving water use

efficiency. Mbava et al. (2020) and Ghosh et al. (2021) corroborate these findings by evidencing a significant positive correlation between soil organic carbon content and water use efficiency, highlighting the importance of organic matter for water retention and the availability of nutrients for plants.

Canonical dimension 1, which covers WUE, OMIR, OCIR, OMR, and OCR, suggests that soil organic matter and organic carbon play vital roles in plants' ability to efficiently utilize available water. This reinforces the need for practices that increase soil organic matter content to improve plant productivity and resilience in environments with limited water availability.

On the other hand, canonical dimension 2 revealed that productivity and soil bulk densities at depths of 10-30 cm and 30-60 cm are essential variables that may indicate the influence of soil structure and compaction on plant productive capacities. The soil bulk density can directly affect the productivity of the coffee tree. A high density can limit root growth, water, and nutrient availability.

Conclusion

The results indicate that managing weed plants and the presence of organic matter in the soil play significant roles in the coffee tree's productivity and efficiency in using water. In addition, the different management methods affected soil bulk density, especially in the surface layers, with the pre-emergent herbicide resulting in higher density and formation of surface crusts. This suggests that cultivation under bare soil can increase soil compaction, which can be a limiting factor for the growth of coffee plants, especially in the surface layers. Principal component analysis revealed a strong correlation between water use efficiency and soil organic matter and organic carbon contents. These findings emphasize the importance of practices that increase organic matter content to improve water use efficiency and, consequently, plant productivity.

Acknowledgements

This research was financially supported by the Agricultural Research Company of Minas Gerais (EPAMIG). We thank all those who kindly responded to the survey and to those that spread the survey, the Federal University of Lavras (UFLA) and EPAMIG. The authors wish to thank the Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) for granting scholarships.

Funding

This research was funded by Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); Consórcio Pesquisa café; Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) and Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia do Café (INCT café).

References

Alcântara EN, et al. 2015. Influence of different weed management types on coffee productivity. [Portuguese]. Available from: <http://www.sbicafe.ufv.br:80/handle/123456789/3587>.

Anwar MP, et al. 2021. Weeds and their responses to management efforts in a changing climate. *Agronomy*, v. 11, n. 10, p. 1921. Available from: <https://doi.org/10.3390/agronomy11101921>.

Campos AAV, et al. 2022. Interação entre faixas de controle e manejos na entrelinha e seus efeitos no crescimento e produtividade do cafeeiro na região do cerrado mineiro. XXII Simpósio Brasileiro de Pesquisa em Cafeicultura Irrigada.

Cogo FD, et al. 2013. Organic carbon stocks in soils under coffee plantations with different invasive plant control systems. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 34, n. 3, p. 1089-1098. Portuguese. Available from: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n3p1089>.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). 2024. <https://www.conab.gov.br/info->

agro/safras/cafe. Accessed 13 May 2024.

Da Silva Ávila EA, et al. 2020. Relationship of gas exchanges in different phenological phases with coffee productivity in the Cerrado. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 7, p. e293974123-e293974123. Available from: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.4123>.

De Oliveira IP, et al. 2023. Inhibition of respiration by light in *Coffea arabica*. *Coffee Sci.* 18: e182162–e182162. Available from: <https://doi.org/10.25186/v18i.2162>.

De Oliveira LB, et al. 1979. Manual de métodos de análise de solo.

EMBRAPA -Embrapa Solos. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília-DF: Embrapa Informação Tecnológica; Brasília-DF: Embrapa Solos, 2009. 627p.

Fontes DR, et al. 2022. Integrated weed management in coffee for sustainable agriculture – a practical Brazilian approach. In: *New Insights in Herbicide Science*. IntechOpen. Available from: <https://doi.org/10.5772/intechopen.108881>.

Freitas AF, et al. 2020. Productivity and beverage sensory quality of arabica coffee intercropped with timber species. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 55, p. e02240. Available from: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.02240>.

Georgiou K, et al. 2022. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. *Nat Commun.* 13(1):3797. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31540-9>.

Ghosh D, et al. 2021. Increasing Water and Nutrient-Use Efficiency in Crops by Innovative and Low-Cost Weed Management. *Ind. J. Fertil.*, v. 17, n. 11, p. 1182-1193

Lisboa LAM, et al. 2021. Morphophysiological characteristics of arabic coffee. *Nativa*, v. 9, n. 1, p. 36-43. Available from: <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i1.11066>.

Ma Y, et al. 2023. Global crop production increases by soil organic carbon. *Nature Geoscience*, v. 16, n. 12, p. 1159-1165. Available from: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24137280>.

Martinez HEP, et al. 2023. Agronomic practices toward coffee sustainability. A review. *Scientia Agricola*, v. 81, p. e20220277. Available from: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0277>.

Martins BH, et al. 2015. Soil organic matter quality and weed diversity in coffee plantation area submitted to weed control and cover crops management. *Soil and Tillage Research*, v. 153, p. 169-174. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.005>.

Mbava N, et al. 2020. Factors affecting crop water use efficiency: A worldwide meta-analysis. *Agricultural Water Management*, v. 228, p. 105878. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105878>.

Mesquita CM, et al. 2016. Manual do café: manejo de cafezais em produção. Belo Horizonte: Emater-MG, p. 1-52.

Meurer KHE, et al. 2020. Modelling dynamic interactions between soil structure and the storage and turnover of soil organic matter. *Biogeosciences*, v. 17, n. 20, p. 5025-5042. Available from: <https://doi.org/10.5194/bg-17-5025-2020>.

Muñoz CAU, Bejarano LM, Acuña JR. 2021. Effect of fruit load of the first coffee harvests on leaf gas exchange. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 51, p. e69865. Available from: <https://doi.org/10.1590/1983-40632021v5169865>.

Perdoná MJ, Soratto RP, Esperancini MST. 2015. Productive and economic performance of the consortium of Arabica coffee and macadamia nut trees. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*,

v. 50, p. 12-23. [Portuguese]. Available from: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000100002>.

Rigal C, Xu J, Vaast P. 2020. Young shade trees improve soil quality in intensively managed coffee systems recently converted to agroforestry in Yunnan Province, China. *Plant and Soil*, v. 453, p. 119-137. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04004-1>.

Rodrigues VGS, et al. 2015. *Sistemas agroflorestais em cafeeiro*.

Solos, EMBRAPA et al. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, v. 3, 2013.

Teixeira HM, et al. 2021. 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 & Environment*, v. 305, p. 107171. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107171>.

Zhao Q, et al. 2018. Long-term coffee monoculture alters soil chemical properties and microbial communities. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 6116. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24537-2>.

Ziska LH. 2020. Climate change and the herbicide paradigm: Visiting the future. *Agronomy*, v. 10, n. 12, p. 1953. Available from: <https://doi.org/10.3390/agronomy10121953>.

TERCEIRA PARTE

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente tese investigou a interação entre sistemas de cultivo, manejos de entrelinha e a dinâmica do carbono em lavouras cafeeiras, com o propósito de compreender como diferentes estratégias de manejo podem contribuir para a mitigação das mudanças climáticas e para a sustentabilidade do agroecossistema. Diante dos resultados obtidos, verifica-se que os objetivos propostos foram plenamente alcançados, evidenciando que o manejo adotado na entrelinha e a escolha das espécies arbóreas em sistemas consorciados influenciam de forma significativa os estoques de carbono, bem como a condição fisiológica e estrutural do sistema produtivo.

De modo geral, as hipóteses que orientaram este estudo, de que sistemas mais diversificados e manejos conservacionistas favoreceriam o acúmulo e a estabilização do carbono e promoveriam maior resiliência do cafeeiro, foram confirmadas nas condições experimentais avaliadas. Os resultados indicam que a transição para modelos de manejo com maior complexidade ecológica podem representar uma estratégia promissora para o aumento do acúmulo de carbono nos sistemas e até a redução das emissões líquidas de gases de efeito estufa na cafeicultura.

No primeiro artigo, verificou-se que sistemas agroflorestais apresentam maior potencial como sumidouros de carbono em comparação à monocultura, destacando-se o papel das espécies arbóreas na modulação do microclima e na melhoria das condições edáficas. Observou-se que determinadas espécies contribuíram para maior acúmulo de carbono no solo, inclusive em camadas subsuperficiais, reforçando a importância da diversificação estrutural do sistema.

Os resultados do segundo artigo evidenciaram que os diferentes manejos de entrelinha influenciam diretamente o acúmulo e a distribuição do carbono nos compartimentos do sistema cafeeiro. Observou-se que manejos menos intensivos favoreceram maiores estoques de carbono, enquanto intervenções mais frequentes estiveram associadas a menores valores, destacando a importância do manejo das plantas espontâneas na modulação dos estoques de carbono e no funcionamento do sistema produtivo.

A magnitude do impacto ambiental desses sistemas de manejo torna-se evidente ao converter o estoque de carbono em dióxido de carbono equivalente (CO₂e). A diferença de 22 t ha⁻¹ observada entre o manejo Sem Capina (T6) e o Herbicida Residual (T2), encontrada no segundo artigo, representa o sequestro líquido de 80,74 t ha⁻¹ de CO₂e. Esse valor é obtido pela multiplicação do estoque de carbono pelo fator 3,67, correspondente à razão entre as massas moleculares do CO₂e do C (ANDRADE et al., 2019; IPCC, 2006). Assim, esses dados demonstram que a simples alteração na forma de controle da entrelinha permite que a cafeicultura atue como um potente sumidouro de gases de efeito estufa, agregando valor ambiental e econômico à propriedade.

A integração desses resultados com o terceiro artigo permitiu avançar na compreensão dos mecanismos ecofisiológicos, indicando que maiores estoques de carbono estão associados a um funcionamento fisiológico mais eficiente do cafeeiro, especialmente em ambientes com melhor conservação hídrica e térmica. Assim, os resultados sugerem que o acúmulo de carbono no sistema não se restringe a um processo passivo, mas reflete a interação entre condições edáficas favoráveis e desempenho fotossintético aprimorado.

Como contribuição para o avanço do conhecimento científico, esta tese fornece evidências sobre os efeitos de estratégias de manejo na dinâmica do carbono em sistemas cafeeiros, contribuindo para o aprimoramento de indicadores de sustentabilidade e para o embasamento de políticas voltadas à mitigação das mudanças climáticas. Do ponto de vista prático, os resultados indicam a importância da manutenção da cobertura vegetal e da diversificação do sistema produtivo, demonstrando que as plantas espontâneas, quando manejada adequadamente, pode atuar como componente funcional na regulação microclimática e na conservação do solo.

Apesar das contribuições apresentadas, algumas limitações devem ser consideradas. A variabilidade interanual associada ao ciclo bienal do cafeeiro pode influenciar a alocação de carbono entre crescimento vegetativo e produção, o que ressalta a necessidade de avaliações em séries temporais mais longas. Adicionalmente, fatores como a heterogeneidade espacial do solo e o tempo de monitoramento podem limitar a extrapolação dos resultados para outras condições edafoclimáticas, devendo tais aspectos ser considerados em interpretações futuras.

Como perspectivas de pesquisa, recomenda-se a ampliação de estudos de longo prazo que integrem abordagens isotópicas para elucidar a dinâmica da matéria orgânica e o tempo

de residência do carbono no solo. Além disso, torna-se fundamental avançar na quantificação de créditos de carbono gerados por diferentes manejos, estabelecendo o balanço líquido de carbono ao comparar o sequestro nos compartimentos biológicos com as emissões antropogênicas da lavoura. Sugere-se, ainda, estudos de equivalência ambiental que correlacionem o potencial mitigador do sistema cafeeiro com a compensação de emissões de outros setores poluentes. Tais abordagens permitirão uma avaliação conjunta dos aspectos econômicos e ambientais, fortalecendo a compreensão da sustentabilidade em suas múltiplas dimensões e posicionando a cafeicultura como peça estratégica na economia verde.

Em síntese, os resultados demonstram que sistemas cafeeiros com maior diversidade biológica e cobertura permanente do solo tendem a apresentar maior capacidade de acumulação e conservação de carbono, além de maior estabilidade funcional frente a condições ambientais adversas. Dessa forma, o manejo baseado em princípios ecológicos configura-se como um caminho consistente para o fortalecimento da resiliência produtiva e ambiental da cafeicultura diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, H. J.; ZAPATA, P. C. Mitigation of climate change of coffee production systems in Cundinamarca, Colombia. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 3, p. e20180126, 2019.

AWAZI, N. P. Climate change mitigation and adaptation in Cameroon through cocoa and coffee-based agroforestry systems. **Discover Forests**, v. 1, n. 1, p. 8, 2025.

BUNN, C. et al. A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. **Climatic change**, v. 129, n. 1, p. 89-101, 2015.

CHAVES J.C.D. Utilização racional de planta de cobertura em lavouras cafeeiras. In: VI Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 2009a, Londrina - PR. IV Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil. Brasília - DF: Embrapa Café. 2005.

CONAB, Campanha nacional de abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: café – Safra 2022 3º Levantamento –setembro2022. Conab - Produção de café está estimada em 50,38 milhões de sacas na safra 2022.

COSTA–ALVO, Engº Agrº Glauberto Moderno; CONSULTORIA, T. A. Guia Prático de Tecnologia de Aplicação de Herbicida e Segurança no Trabalho na cultura do Café. 2019.

CRAPARO, A. C. W., P. J. A. VAN A., P. LÄDERACH, L. T. P. JASSOGNE and S. W. Grab. Coffea arabica yields decline in Tanzania due to climate change: Global implications. **Agric. Forest Meteo.** 2015.

CRISTÓBAL-ACEVEDO, D., TINOCO-RUEDA, J. Á., PRADO-HERNÁNDEZ, J. V., & Hernández-Acosta, E. Soil carbon and nitrogen in tropical montane cloud forest, agroforestry and coffee monoculture systems. **Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente**, 25(2), 169-184. 2019.

DAVIS, A. P. et al. High extinction risk for wild coffee species and implications for coffee sector sustainability. **Science advances**, v. 5, n. 1, p. eaav3473, 2019.

DE OLIVEIRA CARVALHO, T., JÚNIOR, K. S. F., & BRIGANTE, G. P. Effect of use of blends of coverage plants consoriated with the arabic coffee. 2020.

FERREIRA, C. C. et al. Cafeicultura: Recuperação de áreas degradadas e uso de práticas agroecológicas no manejo do café em região de montanhas. 2021.

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 & Environment**, 294, 106858. 2020.

GRÜTER, R. et al. Expected global suitability of coffee, cashew and avocado due to climate change. **PloS one**, v. 17, n. 1, p. e0261976, 2022.

HERGOUALC'H, K. et al. Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 148, p. 102-110, 2012.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama: IGES, 2006.

IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023.

JHA, S. et al. Shade coffee: update on a disappearing refuge for biodiversity. **BioScience**, v. 64, n. 5, p. 416-428, 2014.

LASHERMES, P. et al. Molecular characterisation and origin of the *Coffea arabica* L. genome. **Molecular and General Genetics MGG**, v. 261, n. 2, p. 259-266, 1999.

LIMA, I. de M., et al. "Características químicas da serrapilheira em lavoura de café conilon cultivada a pleno sol ou sombreada com seringueira." In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 33., 2007, Lavras. Anais... Brasília, DF: Embrapa Café, 2009., 2017.

LUGO-PÉREZ, J. et al. The importance of shade trees in promoting carbon storage in the coffee agroforest systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 355, p. 108594, 2023.

MAGRACH, A. and J. GHAZOUL. Climate and pest-driven geographic shifts in global coffee production: Implications for forest cover, biodiversity and carbon storage. **PLoS One**, 10: e0133071. 2015.

MANFRE E.R. et al. O sistema de plantio direto na produção de milho. A importância das plantas de cobertura em lavouras. *Anais Sint agro*. 11(1). 2019.

MARTINS, L. D., EUGENIO, F. C., RODRIGUES, W. N., TOMAZ, M. A., SANTOS, A. R., & RAMALHO, J. C. Carbon and water footprints in Brazilian coffee plantations-the spatial and temporal distribution. **Emirates journal of food and agriculture**. 2018.

MARTINS, L. D., F. C. EUGENIO, W. N. RODRIGUES, W. C. Jr. JESUS, M. A. TOMAZ, J. D. C. RAMALHO and A. R. SANTOS. Climatic Vulnerability in Robusta Coffee - Mitigation and Adaptation. 1st ed. Alegre-ES: CAUFES, Brazil. p. 52. 2017.

MEYLAN L, GARY C, ALLINNE C, ORTIZ J, JACKSON L, RAPIDEL B. Evaluating the effect of shade trees on provision of ecosystem services in intensively managed coffee plantations. **Agric Ecosyst Environ** 245:32– 42. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.005>. 2017.

OLIVEIRA, I. P. de; LIMA, A. F.; SANTOS, L. C.; FERREIRA, A. D.; ABRAHÃO, J. C. de R.; ALCÂNTARA, E. N. de; ANDRADE, V. T.; RAPOSO, F. V.; VENTURINI, R. P.; CARVALHO, G. R. Weed management influences the accumulation of organic matter in the soil and productivity in coffee farming. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, [s. l.], 2024. DOI: 10.1002/nzc2.70159.

RUIZ-GARCÍA, P. et al. Projections of local knowledge-based adaptation strategies of Mexican coffee farmers. **Climate**, v. 9, n. 4, p. 60, 2021.

SALGADO VERAMENDI, N. et al. Carbon storage in coffee agroforestry systems: Role of native and introduced shade trees in the central Peruvian Amazon. **Agriculture**, v. 15, n. 13, p. 1415, 2025.

SAN MARTIN RUIZ, M., REISER, M., & KRANERT, M. Nitrous Oxide Emission Fluxes in Coffee Plantations during Fertilization: A Case Study in Costa Rica. **Atmosphere**, 12(12), 1656. 2021.

SANTOS, E. B. S.; JUNIOR, K. S. F.; BRIGANTE, G. P. Avaliação de herbicidas no controle de plantas daninhas no cafeeiro. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 16, p. e519111638529-e519111638529, 2022.

SCALABRIN, S. et al. A single polyploidization event at the origin of the tetraploid genome of *Coffea arabica* is responsible for the extremely low genetic variation in wild and cultivated germplasm. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 4642, 2020.

SOTO-PINTO, L. et al. Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. **Agroforestry Systems**, v. 78, n. 1, p. 39-51, 2010.

TAVARES, P. D. S., GIAROLLA, A., CHOU, S. C., SILVA, A. J. D. P., & LYRA, A. D. A. Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. **Regional Environmental Change**, 18(3), 873-883. 2018.

VAN RIKXOORT H, SCHROTH G, LADERACH P, RODRIGUEZ-SANCHEZ B. Carbon footprints and carbon stocks reveal climate-friendly coffee production. **Agron Sustain Dev** 34:887–897. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0223-8>. 2014.

VU, O. T. K. et al. Coffee and gastronomy: a potential ‘marriage’? The case of Vietnam. **International Journal of Contemporary Hospitality Management**, v. 35, n. 6, p. 1943-1965, 2023.