

MARIANA MAGALHÃES CAETANO

**ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO COM O
USO DE PLANTAS DE COBERTURA EM ÁREA TERRACEADA CULTIVADA
COM CAFEIEIRO E FRUTÍFERAS**

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

Orientador: Clever Briedis

Coorientadores: Gustavo Franco de Castro
Rafael da Silva Teixeira

**VIÇOSA - MG
2024**

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

T

C128a
2024

Caetano, Mariana Magalhães, 1996-

Atributos químicos, físicos e biológicos do solo com o uso de plantas de cobertura em área terraceada cultivada com cafeeiro e frutíferas / Mariana Magalhães Caetano. – Viçosa, MG, 2024.

1 dissertação eletrônica (54 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Clever Briedis.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Agronomia, 2024.

Referências bibliográficas: f. 44-54.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.313>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Solos - Qualidade. 2. Solo adequado para agricultura.
3. Física do solo. 4. Química do solo. 5. Biologia do solo.
6. Sequestro de carbono. 7. Café - Cultivo. 8. Frutas - Cultivo.
I. Briedis, Clever, 1985-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em
Fitotecnia. III. Título.

CDD 22. ed. 631.43


MARIANA MAGALHÃES CAETANO

**ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO COM O USO DE
PLANTAS DE COBERTURA EM ÁREA TERRACEADA CULTIVADA COM
CAFEIEIRO E FRUTÍFERAS**


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

APROVADA: 27 de fevereiro de 2024.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **MARIANA MAGALHAES CAETANO**
Data: 03/07/2024 16:06:53-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Mariana Magalhães Caetano
Autora

Documento assinado digitalmente
 **CLEVER BRIEDIS**
Data: 03/07/2024 16:55:54-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Clever Briedis
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus, o meu amparo, protetor e guia.

Aos meus pais, Paulo e Célia, por nunca terem medido esforços para que eu tivesse acesso à educação de qualidade. A minha irmã, Mônica, pelos conselhos, preocupações e orientações em todas as fases da minha vida. Ao meu namorado, Gilson, pelo amor, cuidado e apoio em todos esses anos.

Às minhas queridas avós, Amélia e Conceição, meus exemplos de humildade, força e coragem. A toda a minha família, especialmente primas e primos, que fazem a vida ter mais sentido e graça.

Às amigas de infância, aos amigos da graduação e pós-graduação.

Ao professor Clever Briedis, pela orientação durante o trabalho de pesquisa, pela solicitude e por todo o conhecimento compartilhado.

Aos meus coorientadores, Gustavo e Rafael, pelas contribuições que foram essenciais ao trabalho desenvolvido.

Aos meus colegas Alex, Igor, Jorge e Milena pela ajuda e companheirismo nas coletas e análises. Aos colegas do laboratório de Isótopos Estáveis do Departamento de Solos da UFV (LIE), especialmente aos incríveis técnicos Humberto Rosado e João Milagres, por todo o auxílio durante a minha pesquisa.

A todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta. Vocês estarão sempre em minhas orações.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Não existe ser humano sadio se o solo não for sadio”

Ana Maria Primavesi

RESUMO

CAETANO, Mariana Magalhães, Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2024. **Atributos químicos, físicos e biológicos do solo com o uso de plantas de cobertura em área terraceada cultivada com cafeeiro e frutíferas.** Orientador: Clever Briedis. Coorientadores: Gustavo Franco de Castro e Rafael da Silva Teixeira.

A mensuração de atributos específicos do solo pode servir como potenciais indicadores da sua qualidade. O objetivo desse estudo foi avaliar os atributos químicos, físicos e biológicos de qualidade do solo em um sistema integrado de café (*Coffea arabica* L.), bananeira 'Prata' (*Musa* spp.), bananeira 'Maçã' (*Musa acuminata* × *M. balbisiana*) e abacateiro (*Persea americana*) em área terraceada, cultivado com plantas de cobertura. O terraceamento da área e o plantio foram realizados no primeiro semestre de 2020 na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão (UEPE) do Departamento de Solos (DPS) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) e a coleta das amostras de solos para a realização desse estudo foi realizada em maio de 2023. Utilizou-se o delineamento em blocos casualizados (DBC) com três repetições. Os tratamentos na entrelinha do cafeeiro foram compostos por braquiária (*Urochloa ruziziensis*), amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) e um tratamento controle com vegetação espontânea. As profundidades de solo avaliadas foram de 0–5, 5–10, 10–20 e 20–40 cm. Os tratamentos com as plantas de cobertura foram capazes de aumentar os estoques de C orgânico total (COT), N total do solo (NT) e o C lábil (CL). O C da biomassa microbiana (CBM) e o quociente microbiano (qMic) foram superiores no tratamento de braquiária, enquanto a respiração basal do solo (RBS) e o quociente metabólico do solo (qCO₂) foram maiores para o amendoim forrageiro. Quanto aos teores de nutrientes, a braquiária foi eficiente na ciclagem de K e Mg, enquanto o amendoim foi eficiente na ciclagem do P. Estes resultados sugerem que as plantas de cobertura foram capazes de sequestrar mais C no solo, aumentar a atividade microbiana e promover uma ciclagem eficiente de nutrientes, quando comparado à manutenção de somente plantas espontâneas. As respostas encontradas mostram que a agricultura tem um papel crucial na mitigação das consequências das mudanças climáticas, ao melhorar a qualidade do solo e com isso, aumentar o sequestro de C.

Palavras-chave: Agricultura regenerativa; Saúde do solo; Sequestro de carbono.

ABSTRACT

CAETANO, Mariana Magalhães, Universidade Federal de Viçosa, February, 2024.
Soil chemical, physical and biological properties subjected to cover crops in a terraced land cultivated with coffee and fruit trees. Orientador: Clever Briedis.
Coorientadores: Gustavo Franco de Castro e Rafael da Silva Teixeira.

The measurement of specific soil attributes can serve as potential indicators of its quality. The aim of this study was to evaluate the chemical, physical, and biological attributes of soil quality in an integrated system of coffee (*Coffea arabica* L.), 'Prata' banana (*Musa* spp.), 'Maçã' banana (*Musa acuminata* × *M. balbisiana*), and avocado (*Persea americana*) in a terraced area, cultivated with cover crops. The terracing of the area and planting were carried out in the first semester of 2020 at the Teaching, Research, and Extension Unit (UEPE) of the Department of Soils (DPS) of the Federal University of Viçosa (UFV), and soil sample collection for this study was conducted in May 2023. A randomized complete block design (RCBD) with three replications was used. Treatments in the coffee interrows consisted of brachiaria (*Urochloa ruziziensis*), forage peanut (*Arachis pintoi*), and a control treatment with spontaneous vegetation. Soil depths evaluated were 0–5, 5–10, 10–20, and 20–40 cm. Cover crop treatments were able to increase total organic C (TOC) stocks, total soil N (TN), and labile C (LC). Microbial biomass C (MBC) and microbial quotient (qMic) were higher in the brachiaria treatment, while soil basal respiration (SBR) and soil metabolic quotient (qCO₂) were higher for forage peanut. Regarding nutrient contents, brachiaria was efficient in cycling K and Mg, while peanut was efficient in cycling P. These results suggest that cover crops were able to sequester more C in the soil, increase microbial activity, and promote efficient nutrient cycling compared to maintaining only spontaneous plants. The findings indicate that agriculture plays a crucial role in mitigating the consequences of climate change by improving soil quality and thereby increasing C sequestration.

Keywords: Regenerative agriculture; Soil health; Carbon sequestration.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
3. MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1 Descrição da área	11
3.2 Preparo do solo	11
3.3 Plantio e tratos culturais do cafeeiro e das fruteiras.....	11
3.4 Coleta de solo e preparo de amostras	13
3.5 Análises Biológicas	14
3.6 Análises Físicas	16
3.7 Análises Químicas	18
3.8 Análises Estatísticas	18
4. RESULTADOS.....	20
4.1 Estoques de carbono orgânico do solo e nas frações da MOS.....	20
4.2 Estoques de nitrogênio total e nas frações da MOS	21
4.3 Carbono lábil	23
4.4 Carbono solúvel em água quente e respiração basal do solo.....	24
4.5 Quociente metabólico e quociente microbiano.....	25
4.6 Textura do solo	27
4.7 Densidade do solo, densidade de partícula, microporosidade, macroporosidade e porosidade total.....	27
4.8 Capacidade de água disponível e curva de retenção de água no solo	28

4.9 Teores dos nutrientes e propriedades químicas do solo	30
5. DISCUSSÃO	33
5.1 Carbono e nitrogênio do solo	33
5.2 Biomassa microbiana do solo	37
5.3 Atributos físicos.....	39
5.4 Atributos químicos.....	41
6. CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS.....	44

1. INTRODUÇÃO

A maior ocorrência de secas prolongadas, tempestades, ondas de calor, crescimento dos índices de pobreza, insegurança alimentar e desigualdade social são algumas das consequências das mudanças climáticas, provocadas pelo aquecimento global (Jain, 1993; Nguyen et al., 2023). O dióxido de carbono (CO₂) é o principal gás de efeito estufa (GEE), pois está presente na atmosfera em maior concentração e está ligado às atividades humanas (IPCC, 2021; Chataut et al., 2023).

No Brasil, a mudança de uso da terra e florestas é a principal fonte das emissões de GEE, que leva a perdas dos serviços ecossistêmicos - mecanismos naturais de conservação e regulação dos agroecossistemas (Nguyen et al., 2023; Ribeiro et al., 2023; Ritchie & Roser, 2023). Um exemplo claro é a degradação da matéria orgânica do solo (MOS), que traz prejuízos econômicos e ambientais (Francaviglia et al., 2023).

A MOS é composta por resíduos orgânicos que passam pela decomposição microbiana e sofre transformações em sua estrutura e composição (Lehmann & Kleber, 2015). Majoritariamente composta por carbono, ela é a responsável pelo potencial de estoque de carbono no solo ser superior a parte aérea das plantas, especialmente pela contribuição radicular (Janzen, 2004; Usuga et al., 2010). Por isso, a adoção de sistemas capazes de melhorar ou regenerar a saúde do solo é essencial para garantir a produção sustentável de alimentos (Rehberger et al., 2023).

Entre as práticas recomendadas nesses sistemas, destaca-se o uso de plantas de cobertura. As principais plantas utilizadas com essa finalidade são as gramíneas e leguminosas (Li et al., 2023). As gramíneas pela elevada capacidade de produção de biomassa e pela expansão do seu sistema radicular que atinge elevadas profundidades. As leguminosas pela habilidade em fixar o N atmosférico, por meio de associações simbióticas entre microrganismos e seu sistema radicular (Garba et al., 2024; Rodriguez et al., 2020).

Devido ao potencial em melhorar os atributos biológicos, químicos e físicos do solo ao mesmo tempo que oferece proteção contra a erosão, as plantas de

cobertura se destacam ainda mais em sistemas vulneráveis, como em áreas declivosas (Acharya et al., 2024). O relevo acentuado traz dificuldades de acesso para o manejo da lavoura, assim como deixa o solo mais suscetível a erosão. Para contornar esses problemas, além do uso das plantas de cobertura, também pode ser adotado a construção de terraços – que podem aumentar a infiltração de água ao mesmo tempo que melhoram a drenagem no terreno (Tian et al., 2023).

Portanto, a agricultura é uma importante aliada para mitigar o efeito das mudanças climáticas (Eckardt et al., 2023). Essa contribuição é alcançada através da adoção de práticas sustentáveis que podem ser inseridas até mesmo em atividades muito tradicionais, como a cafeicultura. No Brasil, maior produtor mundial, a atividade tem uma grande importância econômica e cultural, sendo o estado de Minas Gerais o maior responsável por sua produção (USDA, 2023; CONAB, 2023).

Com isso, a hipótese desse estudo é a de que o uso de plantas de cobertura será eficiente para melhorar a qualidade do solo em um sistema integrado de cafeeiro e fruteiras em terraços. Para isso, o objetivo será avaliar os atributos biológicos, químicos e físicos do solo sob os tratamentos com as plantas de cobertura, na entrelinha do cafeeiro.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área

O experimento foi instalado na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão (UEPE) do Departamento de Solos (DPS) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), localizada em Viçosa, Minas Gerais, Brasil (20°45'12.82"S e 42°50'37.22"O).

De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, o clima predominante da região é o tipo Cwa, com inverno seco e verão quente e úmido. O solo é o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), de textura muito argilosa. A altitude média é de 740 m e a pluviosidade média anual é de 1288 mm.

3.2 Preparo do solo

Em janeiro de 2020, a área experimental foi terraceada através da construção de terraços do tipo patamar, como técnica conservacionista de solo e água. Com o uso de uma retroescavadeira, os terraços foram construídos com quatro metros de largura, seguindo as curvas de nível do terreno. Em seguida a dose de calcário recomendada segundo a análise de solo, foi de quatro t ha⁻¹, que foi incorporado com grade. Para evitar a erosão e melhorar a estabilização dos terraços, foi feito semeio de *Urochloa ruziziensis* a lanço no talude dos terraços.

3.3 Plantio e tratos culturais do cafeeiro e das fruteiras

O plantio do cafeeiro e das fruteiras foi realizado em abril de 2020. Para o plantio do cafeeiro, foram abertos sulcos a 60 cm de profundidade, com o sulcador de três pontos, no centro do terraço. O café foi escolhido como componente principal do sistema, devido a sua importância econômica e cultural na região.

A variedade de café escolhida para o experimento foi a Paraíso, pertencente a *Coffea arabica* L., em espaçamento de 0,5 x 6,0 m. As fruteiras escolhidas foram bananeiras 'Prata' (*Musa spp.*) e 'Maçã' (*Musa acuminata* × *M. balbisiana*) e abacateiros (*Persea americana*). Elas foram plantadas no talude do terraço (local entre um patamar e outro) para melhor aproveitamento da área e diversificação do sistema.

As adubações do cafeeiro foram realizadas baseadas nas sugestões contidas no livro “Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação” (Ribeiro et al., 1999). Corretivos, gesso, cama de frango e fertilizantes, foram aplicados no sulco de plantio (Tabela 1). Foi feito um desnível de aproximadamente 10% do meio da entrelinha até a linha, para facilitar a drenagem da água para a linha do café.

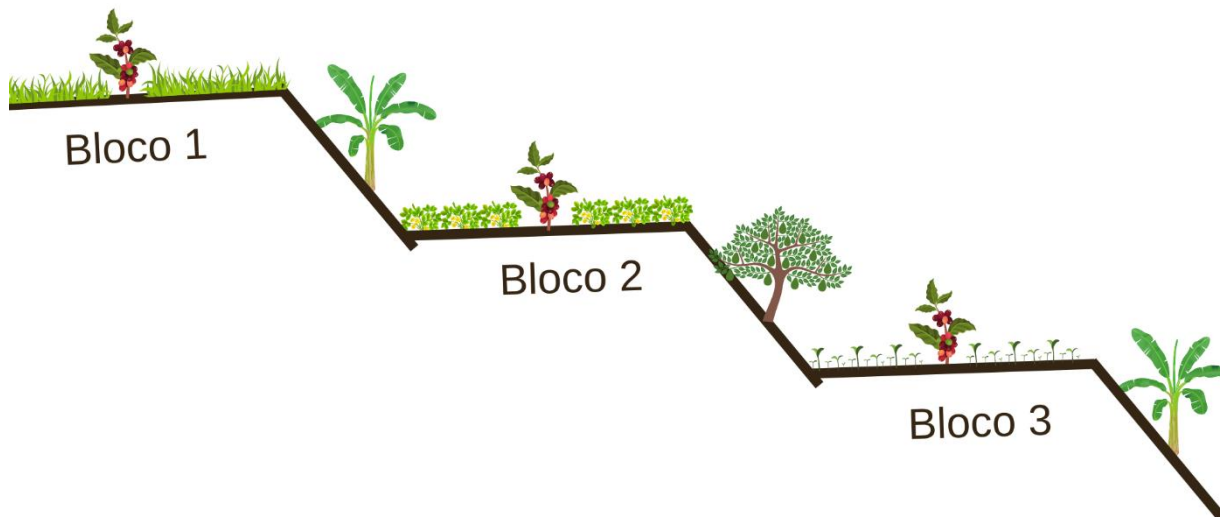
Tabela 1 - Quantidade de nutrientes aplicados no plantio do cafeeiro em abril de 2020

C	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Zn	Cu
----- g planta ⁻¹ -----									
188	16	13	23	258	25	50	0	0	0
----- Kg ha ⁻¹ -----									
625	52	43	75	860	84	165	0	0	0

Também em abril de 2020, plantas de cobertura foram implantadas nas entrelinhas do cafeeiro como forma de avaliação de seu potencial na melhoria da qualidade do solo. As plantas de cobertura utilizadas foram a braquiária (*Urochloa ruziziensis*), gramínea conhecida pela grande produção de biomassa vegetal, e o amendoim forrageiro (*Arachis pinto*), leguminosa com elevada capacidade de fixação biológica de nitrogênio.

O experimento está sendo conduzido em blocos casualizados, com três repetições (Figura 1). Foram dispostos três níveis de plantas de cobertura: amendoim forrageiro, braquiária e o controle (sem planta de cobertura, somente com plantas espontâneas).

Figura 1 - Esquema representativo da área experimental dividida em blocos, em que as plantas de café ocupam o centro dos patamares do terraço, as plantas de cobertura foram instaladas na entrelinha do cafeeiro e as fruteiras se encontram entre um patamar e outro, Viçosa-MG



Fonte: Elaborado pela autora

3.4 Coleta de solo e preparo de amostras

Em maio de 2023, três anos após o início do experimento, amostras de solo foram coletadas. Para a amostragem, foram feitas coletas de solo na entrelinha do cafeeiro, com o uso de um trado tipo sonda para as amostras deformadas e com o uso do trado tipo uhland para as amostras indeformadas. Amostras de solo simples foram coletadas aleatoriamente dentro de cada tratamento e homogeneizadas para formar uma amostra composta. As profundidades de coleta foram de 0–5, 5–10, 10–20 e 20–40 cm. Elas foram acondicionadas em caixa térmica a $\pm 18^{\circ}\text{C}$ ainda no campo e destinadas ao laboratório de Isótopos Estáveis (LIE) do DPS na UFV, onde ficaram armazenadas a $\pm 4^{\circ}\text{C}$.

Para as análises microbianas que necessitam de amostra fresca, elas foram peneiradas ($< 2\text{ mm}$) e mantidas sob refrigeração. Para as análises que necessitam de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), as amostras foram suspensas em bancada em casa de vegetação até a completa secagem e posterior peneiramento ($< 2\text{ mm}$). O efeito

dos tratamentos sobre a qualidade do solo foi avaliado através de seus atributos químicos, físicos e biológicos.

3.5 Análises Biológicas

O fracionamento físico da matéria orgânica foi feito em amostras de TFSA, sendo separadas em duas frações: matéria orgânica particulada (MOP, > 53 µm) e matéria orgânica associada aos minerais (MOAM), silte e argila (< 53 µm). Brevemente, 10 g de TFSA foram agitadas com 30 mL de solução de hexametáfosfato de sódio 0,05 mol L⁻¹, por 15 horas em agitador horizontal como descrito por Cambardella & Elliott (1992). Para a separação úmida, foi utilizada a peneira com malha de 53 µm. O material retido na peneira é a MOP e o que passou é a MOAM. Após a separação, as amostras foram colocadas para secar em estufa a 60°C, até o peso constante e em seguida moídas e peneiradas com peneira de malha de 250 µm.

Os teores de C das frações, MOP e MOAM, e o carbono orgânico do solo (COS) foram determinadas pelo método de oxidação via úmida com dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) de acordo com a metodologia proposta por Mendonça e Matos (2017), adaptado de Yeomans e Bremner (1988), Bremner e Mulvaney (1983) e Tedesco et al. (1995).

O estoque de carbono no solo e nas frações da MOS foram calculados segundo Veldkamp (1994), como descrito na equação:

$$EstC = \frac{(COS * Ds * e)}{10}$$

Em que,

EstC = estoque de carbono orgânico do solo ou das frações em determinada profundidade (Mg ha⁻¹);

COS = teor de carbono orgânico do solo ou das frações na profundidade amostrada (g kg⁻¹);

Ds = densidade do solo na profundidade amostrada (g cm⁻³);

e = espessura da camada considerada (cm);

10 = fator de conversão de kg m^{-2} para Mg ha^{-1} .

O carbono lábil (CL) foi determinado pela oxidação com permanganato de potássio (KMnO_4), segundo adaptação do método proposto por Culman et al. (2012). O CL é estimado considerando que 1,0 mmol de MnO_4^- é consumido na oxidação de 0,75 mmol (9g) de carbono.

O carbono extraído em água quente (C_{aq}) foi determinado conforme descrito por Haynes e Francis (1993). Para isso, amostras de solo foram adicionadas em tubos de centrifuga com água deionizada, as quais foram colocadas em estufa a 80°C por 16h. Depois do período de incubação, o C_{aq} foi determinado da solução sobrenadante pelo método de combustão úmida (Walkley e Black), adaptado por Mendonça e Matos (2017). Por ter estreita relação com o carbono da biomassa microbiana (Ghani et al., 2003), para esse estudo o C_{aq} foi utilizado como substituto para essa fração biológica nos cálculos de quociente metabólico do solo e de quociente microbiano.

Para determinação da respiração basal do solo (RBS), foram utilizadas amostras de solo coletadas em 0–5, 5–10 e 10–20 cm de profundidade. Essas amostras foram incubadas em frascos de vidro de 500 mL e mantidas em sala escura a $\pm 25^\circ\text{C}$ por aproximadamente 38 dias. Na atmosfera dos frascos, o fluxo de C-CO₂ liberado pela respiração microbiana foi coletado por meio de seringas (60 mL) com válvulas reguladoras de três vias em sua extremidade. Após a coleta, as concentrações de C-CO₂ das amostras de gases foram determinadas por espectroscopia de cavidade ressonante tipo Ring-Down - CRDS (Picarro, Sunnyvale, CA).

O quociente metabólico do solo ($q\text{CO}_2$), se associa a eficiência de uso do substrato pelos microrganismos do solo. Para sua determinação, foi utilizado a relação entre RBS e C_{mic} (nesse estudo, utilizado o C_{aq}), por unidade de tempo, como descrito na equação (Anderson e Domsch, 1993; Ashraf et al., 2022):

$$q\text{CO}_2 = \frac{\text{RBS}}{\text{C}_{\text{mic}}}$$

Em que,

qCO_2 = quociente metabólico do solo (%);

RBS = taxa de respiração basal do solo (μg de C-CO₂ g⁻¹ h⁻¹);

C_{mic} = teor de carbono da biomassa microbiana (mg de C g⁻¹).

O quociente microbiano (q_{Mic}) é a razão entre o C_{mic} (nesse estudo, utilizado o Caq) e o COT (Sparling, 1992) e se associa a qualidade da matéria orgânica do solo.

$$q_{Mic} = \frac{C_{mic}}{COT}$$

Em que,

q_{Mic} = Quociente microbiano (%);

C_{mic} = Carbono da biomassa microbiana (g kg⁻¹);

COT = teor de carbono orgânico total (mg g⁻¹).

3.6 Análises Físicas

A densidade do solo (D_s) foi calculada dividindo-se o peso seco da amostra indeformada (seca em estufa por 48 h a 105 °C) pelo volume do anel e a densidade de partículas (D_p) foi determinada pelo método do anel volumétrico. A porosidade total (PT) foi obtida pela fórmula:

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

Em que,

PT = Porosidade total da camada avaliada (m³ m⁻³);

D_s = Densidade do solo da camada avaliada (mg m⁻³);

D_p = Densidade de partícula da camada avaliada (mg m⁻³).

A microporosidade (M_i) foi obtida em amostras indeformadas, utilizando a mesa de tensão a 6 kPa. A macroporosidade (M_a) por diferença entre PT e M_i . Todas essas análises foram feitas seguindo a metodologia de Teixeira, et al. (2017).

A análise textural foi realizada pelo método da pipeta, utilizando hidróxido de sódio a $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ como dispersante químico. Esse método é baseado na Lei de Stokes que tem como princípio a velocidade de queda das partículas de areia, silte e argila (Teixeira et al., 2017).

A capacidade de campo (Θ_{cc}) se refere ao conteúdo de água que permanece no solo, após ocorrer a drenagem pela força da gravidade (Eden et al., 2017). Esse ponto geralmente está associado ao potencial matricial (ψ_m) de -10 a -33 kPa. O ponto de murcha permanente (Θ_{PMP}) se refere ao conteúdo de água no solo, em que as plantas já não são capazes de absorver e está relacionado ao ψ_m de -1500 kPa (Hillel, 2003). A capacidade de água disponível (CAD) foi calculada subtraindo o conteúdo volumétrico de água na Θ_{cc} ($\psi_m = 10 \text{ kPa}$) daquele no Θ_{PMP} ($\psi_m = 1500 \text{ kPa}$), de acordo com a fórmula adaptada de Kiehl (1979); Shaw e Yule (1978):

$$CAD = (\Theta_{cc} - \Theta_{PMP}) * D_s * e * 10$$

Em que,

CAD = Capacidade de água disponível da camada avaliada ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$);

Θ_{cc} = umidade na capacidade de campo da camada avaliada (g g^{-1});

Θ_{PMP} = umidade no ponto de murcha permanente da camada avaliada (g g^{-1});

D_s = Densidade de solo na camada avaliada (g cm^{-3});

e = espessura da camada avaliada (cm);

10 = fator de conversão de mm para $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

De acordo com metodologia proposta por Júnior, et al. (2007), para a curva de retenção de água no solo (CRA), amostras de solo indeformadas foram submetidas a tensões de 10, 30, 100, e 1500 kPa nas câmaras de Richards em laboratório.

Quando atingiram o equilíbrio na perda de água, elas foram avaliadas quanto a sua umidade. Para a construção da curva, foi utilizado o modelo proposto por van Genuchten. Ele considera alguns parâmetros de ajuste da equação (“ Θ_r ”, “ Θ_s ”, “ α ” e “ n ”), que foram calculados pelo software RETC 6.02 e seguiram para a análise estatística (Chiorean et al., 2017; Wang et al., 2024).

3.7 Análises Químicas

O Nitrogênio Total (NT), assim como o N das frações, MOP e MOAM, foi determinado por destilação Kjeldahl (Bremner e Mulvaney, 1983; Tedesco et al., 1995). Para calcular o estoque de nitrogênio, foi utilizado a mesma metodologia proposta por Veldkamp (1994) para o cálculo do estoque de carbono.

Os conteúdos disponíveis de cálcio, magnésio, fósforo, potássio, a acidez ativa (pH CaCl_2 0,01 mol L⁻¹), a acidez potencial (H + Al), os teores de alumínio trocável, a soma de bases (SB) e a capacidade potencial de troca catiônica (CTC pH₇) foram determinadas usando amostras deformadas através de métodos analíticos descritos por Donagema, et al. (2011).

3.8 Análises Estatísticas

Os resultados foram analisados estatisticamente em blocos, em que, para as variáveis biológicas, foram consideradas três profundidades e para as demais, foram consideradas quatro profundidades. As coletas foram distribuídas aleatoriamente nas entrelinhas do cafeeiro, sendo as profundidades consideradas como faixas.

Foram utilizadas três repetições. Os dados foram submetidos a uma análise de variância (Tabelas 2 e 3) e testados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk. As médias foram comparadas pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Todos os testes estatísticos foram realizados no software RStudio versão 4.2.3 (RStudio Team, 2023) com o pacote *ExpDes.pt* (Ferreira et al., 2018).

Tabela 2 - Quadro de análise de variância (ANOVA) das variáveis biológicas

Fontes de variação	Graus de liberdade
Blocos	3
Tratamentos	3
Erro A	$(3 \times 3) = 9$
Profundidade	3
Erro B	$(3 \times 3) = 9$
Tratamentos*Profundidade	9
Erro C	$(3 \times 9) = 27$

Tabela 3 - Quadro de análise de variância (ANOVA) das demais variáveis

Fontes de variação	Graus de liberdade
Blocos	3
Tratamentos	3
Erro A	$(3 \times 3) = 9$
Profundidade	4
Erro B	$(3 \times 4) = 12$
Tratamentos*Profundidade	12
Erro C	$(3 \times 12) = 36$

4. RESULTADOS

4.1 Estoques de carbono orgânico do solo e nas frações da MOS

Após três anos de experimento, houve diferença significativa entre os tratamentos com plantas de cobertura e o tratamento com plantas espontâneas no perfil de 0–40 cm de solo para COS, C-MOP e C-MOAM (Tabela 4).

Tabela 4 - Estoques de carbono orgânico do solo (COS), carbono particulado (C-MOP) e carbono associado aos minerais do solo (C-MOAM) em sistema integrado de cafeeiro e fruteiras, com o uso de plantas de cobertura, em diferentes profundidades de solo, Viçosa – MG

Profundidade (cm)	Tratamentos	Frações da MOS		
		COS	C-MOP	C-MOAM
0–5	Braquiária	10,5 a	2,45 ns ^a	8,0 ns
	Amendoim forrageiro	10,3 a	2,04	7,9
	Plantas espontâneas	8,2 b	1,26	6,9
5–10	Braquiária	6,9 ns	0,87 ns	6,1 ns
	Amendoim forrageiro	7,1	0,70	5,6
	Plantas espontâneas	7,1	0,54	6,2
10–20	Braquiária	12,5 ns	1,14 ns	11,4 ns
	Amendoim forrageiro	12,7	1,06	11,8
	Plantas espontâneas	11,2	0,79	10,5
20–40	Braquiária	27,8 a	2,27 ab	24,6 a
	Amendoim forrageiro	27,4 a	2,67 a	24,6 a
	Plantas espontâneas	21,3 b	1,21 b	20,1 b
0–40	Braquiária	57,6 a	6,56 a	51,1 a
	Amendoim forrageiro	57,5 a	6,62 a	49,9 a
	Plantas espontâneas	47,8 b	3,79 b	43,6 b

^a Letras minúsculas comparam o efeito dos tratamentos em cada profundidade. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ns: não significativo.

Nessa camada, o acúmulo de COS nos tratamentos com plantas de cobertura foi 20% maior em relação ao controle, o que resultou em uma taxa de incremento médio anual de COT de 3,4 Mg ha⁻¹ para as duas plantas de cobertura. As camadas de 0–5 e 20–40 cm foram responsáveis por esse resultado, que equivale a

aproximadamente 30% de diferença entre braquiária e amendoim forrageiro, comparados a plantas espontâneas.

Assim como para o COS, houve diferença significativa entre os tratamentos nas frações C-MOP e C-MOAM na camada 0–40 cm. Na fração C-MOP a diferença entre plantas de cobertura e o controle foi menor, de 2,8 Mg ha⁻¹. Entretanto, essa diferença representou um aumento no C-MOP de 75% quando implantado braquiária ou amendoim forrageiro em relação a plantas espontâneas.

Para o C-MOAM, a diferença entre os tratamentos com as plantas de cobertura e o controle foi maior. A braquiária proporcionou um aumento de 7,5 Mg ha⁻¹ e o amendoim forrageiro de 6,3 Mg ha⁻¹. Para essa fração, a maior contribuição do acúmulo de C nos tratamentos com plantas de cobertura no perfil todo do solo também veio da camada de 20–40 cm de solo.

Não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos nas profundidades de 0–5, 5–10 e 10–20 cm para o estoque médio do C-MOP e C-MOAM. Para o COS, apenas em 5–10 e 10–20 cm não houve diferenças.

4.2 Estoques de nitrogênio total e nas frações da MOS

Em 0–40 cm, os tratamentos com as plantas de cobertura apresentaram diferenças significativas em relação ao controle para NT, N-MOP e N-MOAM (Tabela 5). Para o NT, os tratamentos com plantas de cobertura (braquiária e amendoim forrageiro) proporcionaram um acréscimo de 690 kg ha⁻¹ de N quando comparado ao controle. Essa diferença resultou em um incremento de cerca de 230 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N na área do terraço com plantas de cobertura.

Tabela 5 - Estoque de nitrogênio total (NT), associado aos minerais do solo (N-MOAM) e particulado (N-MOP) em sistema integrado de cafeeiro e fruteiras, com o uso de plantas de cobertura como braquiária, amendoim forrageiro e plantas espontâneas, nas profundidades de 0-40 cm de solo, Viçosa – MG

Profundidade (cm)	Tratamentos	Frações da MOS	
		NT	N-MOP N-MOAM
			(Mg ha ⁻¹)

0–5	Braquiária	0,74 b	0,13 ab	0,75 ns
	Amendoim forrageiro	0,91 a	0,23 a	0,73
	Plantas espontâneas	0,72 b	0,08 b	0,60
5–10	Braquiária	0,62 ns	0,05 ns	0,51 ns
	Amendoim forrageiro	0,59	0,06	0,55
	Plantas espontâneas	0,59	0,03	0,49
10–20	Braquiária	1,06 ns	0,06 ns	0,94 ns
	Amendoim forrageiro	1,01	0,08	0,95
	Plantas espontâneas	0,97	0,04	0,90
20–40	Braquiária	2,16 a	0,16 ns	2,00 a
	Amendoim forrageiro	2,05 a	0,19	2,09 a
	Plantas espontâneas	1,66 b	0,10	1,39 b
0–40	Braquiária	4,57 a	0,40 b	4,21 a
	Amendoim forrageiro	4,56 a	0,57 a	4,33 a
	Plantas espontâneas	3,88 b	0,26 c	3,38 b

^a Letras minúsculas comparam o efeito dos tratamentos em cada profundidade. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ns: não significativo.

Na camada de 20–40, também houve diferença no NT entre plantas de cobertura e controle, sendo a principal responsável pelo maior incremento de NT no perfil de 0-40 cm quando implementado as plantas de cobertura nos terraços. Na camada de 0–5 cm, o amendoim forrageiro acumulou cerca de 26% mais NT do que braquiária e plantas espontâneas. Nas demais camadas, não houve diferença entre os tratamentos.

Para o N-MOP, 0–40 cm a diferença entre as plantas de cobertura e o controle foi de 54% superior para a braquiária, e o dobro para amendoim forrageiro. Em 0–5 cm braquiária não apresentou diferença estatística em relação aos demais tratamentos. Por outro lado, o uso do amendoim forrageiro como cultura de cobertura quase triplicou o N-MOP em relação ao controle.

Assim como para o NT, o N-MOAM mostrou diferença significativa em 0–40 cm, com a maior contribuição vindo da camada de 20–40 cm. A diferença entre o tratamento com amendoim forrageiro e o controle, foi de 28% em 0–40 e 50% em 20–40 cm.

Não houve diferença significativa nas camadas de 5–10, 10–20 e 20–40 cm para o N-MOP. Em relação ao N-MOAM 0–5, 5–10 e 10–20 cm também não apresentaram diferenças significativas.

4.3 Carbono lábil

Na profundidade mais superficial, os três tratamentos obtiveram médias diferentes estatisticamente entre si (Tabela 6). O tratamento que resultou em maior CL foi o de amendoim forrageiro, seguido de braquiária e plantas espontâneas respectivamente. Em 5-10 cm, braquiária foi o tratamento com o maior valor do teor médio de CL e superior aos teores médios de amendoim forrageiro e plantas espontâneas.

Tabela 6 - Carbono lábil (CL) em sistema agroflorestal cultivado com cafeeiro e fruteiras, com o uso de plantas de cobertura, em diferentes profundidades de solo, Viçosa – MG

Profundidade (cm)	Tratamentos		
	Braquiária	Amendoim forrageiro	Plantas Espontâneas
	(g kg ⁻¹)		
0-5	1,72 b	2,20 a	1,23 c
5-10	1,09 a	0,75 b	0,80 b
10-20	0,67 a	0,81 a	0,37 b
20-40	0,70 ns ^a	0,80	0,65
0-40	0,87 ab	0,97 a	0,67 b

^a Letras minúsculas comparam o efeito dos tratamentos em cada profundidade. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em 10-20 cm, braquiária e amendoim forrageiro foram iguais entre si com teores médios superiores ao tratamento de plantas espontâneas. Considerando todo o perfil de solo avaliado, 0-40 cm, braquiária e amendoim forrageiro não diferiram estatisticamente entre si. No entanto, o valor médio do teor de CL em amendoim forrageiro foi 44% superior ao de plantas espontâneas, enquanto braquiária e plantas espontâneas foram estatisticamente iguais.

4.4 Carbono solúvel em água quente e respiração basal do solo

O conteúdo de Caq foi diferente entre os tratamentos com as plantas de cobertura na camada de 0–40 cm. A braquiária se sobressaiu em relação ao controle, mas foi estatisticamente igual ao amendoim forrageiro (Tabela 7).

Tabela 7 - Carbono em água quente (Caq) em sistema integrado de cafeeiro e fruteiras, com o uso de plantas de cobertura, em diferentes profundidades de solo, Viçosa – MG

Profundidade cm	Tratamentos		
	Braquiária	Amendoim forrageiro	Plantas Espontâneas
0–5	0,043 a	0,031 b	0,026 b
5–10	0,017 a	0,011 b	0,012 ab
10–20	0,014 a	0,010 ab	0,007 b
20–40	0,015 a	0,010 ab	0,006 b
0–40	0,018 a	0,013 ab	0,010 b

^a Letras minúsculas comparam o efeito dos tratamentos em cada profundidade. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em 5–10 cm, braquiária diferiu estatisticamente de amendoim forrageiro, mas foi igual ao tratamento com plantas espontâneas. Nas profundidades de 10–20 e 20–40 cm, os tratamentos de braquiária e plantas espontâneas foram diferentes entre si, mas iguais ao tratamento com amendoim forrageiro. Para o amendoim forrageiro, em relação ao tratamento controle com plantas espontâneas, não houve diferença estatística em nenhuma das profundidades avaliadas (Tabela 7).

Outro aspecto interessante encontrado no conteúdo de Caq foi a relação de estratificação entre as profundidades amostradas. Por exemplo, para a braquiária, a camada de 0–5 cm foi duas vezes maior que a camada de 5–10, que também foi duas vezes maior que a camada de 10–20 cm. Para amendoim forrageiro e plantas espontâneas, a estratificação esteve presente entre as camadas de 0–5 e 5–10 cm, que apresentou o triplo do conteúdo de Caq (Tabela 7).

A respiração basal do solo (RBS), que é um dos indicadores da atividade microbiana, não apresentou diferença significativa em 0–20 cm de solo (Tabela 8). No entanto, na camada de 0–5 cm, amendoim forrageiro obteve média superior aos demais tratamentos.

Tabela 8 - Respiração basal do solo (RBS) em sistema integrado de cafeeiro e fruteiras, com o uso de plantas de cobertura, em diferentes profundidades de solo, Viçosa – MG

Profundidade (cm)	Tratamentos		
	Braquiária	Amendoim forrageiro	Plantas Espontâneas
	(C-CO ₂ µg g ⁻¹ h ⁻¹)		
0–5	0,86 b	1,17 a	0,75 b
5–10	0,37 ns ^a	0,49	0,35
10–20	0,27 ns	0,31	0,26
0–20	0,44 ns	0,57	0,40

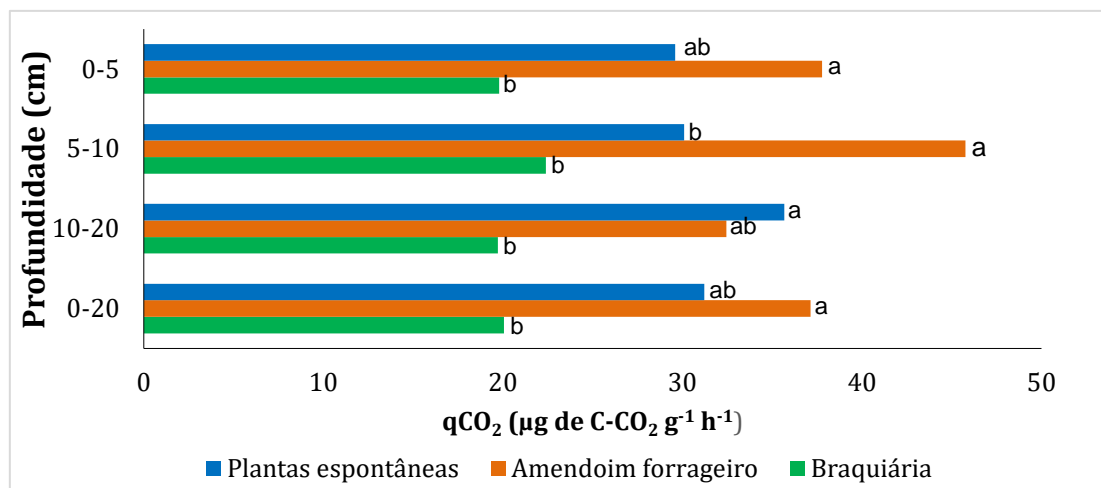
^a Letras minúsculas comparam o efeito dos tratamentos em cada profundidade. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O tratamento com amendoim forrageiro teve um valor de RBS 55% superior à média dos demais tratamentos nessa camada, que não diferiram estatisticamente entre si. Nas camadas de 5–10 e 10–20 cm também não houve diferença entre os tratamentos.

4.5 Quociente metabólico e quociente microbiano

De maneira geral, em todo o perfil do solo o tratamento com amendoim forrageiro demonstrou os maiores valores de qCO₂, enquanto a braquiária obteve os menores (Figura 2). Em 5–10 cm o valor de qCO₂ no tratamento com amendoim forrageiro foi o dobro do tratamento com braquiária e 50% maior que o de plantas espontâneas.

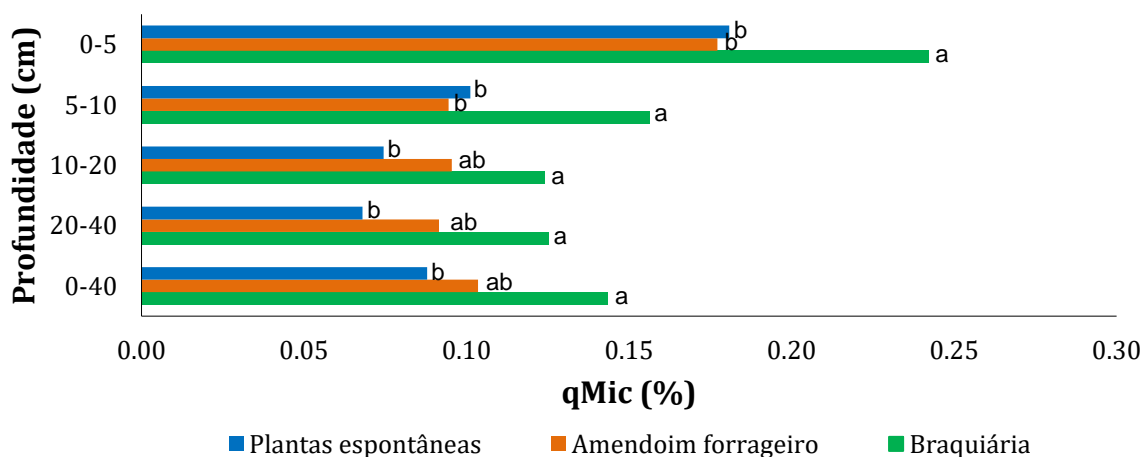
Figura 2 – Quociente metabólico do solo (qCO_2) em sistema integrado de cafeeiro e fruteiras, com o uso de plantas de cobertura, em diferentes profundidades de solo, Viçosa – MG



^a Letras minúsculas comparam o efeito dos tratamentos em cada profundidade. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em relação ao quociente microbiano ($qMic$), em todas as profundidades avaliadas o tratamento com braquiária foi o que obteve maior valor médio, enquanto o de amendoim forrageiro não diferiu de plantas espontâneas em nenhuma delas (Figura 3).

Figura 3 - Quociente microbiano do solo ($qMic$) em sistema integrado de cafeeiro e fruteiras, com o uso de plantas de cobertura, em diferentes profundidades de solo, Viçosa – MG



^a Letras minúsculas comparam o efeito dos tratamentos em cada profundidade. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.6 Textura do solo

Os valores médios do conteúdo de partículas de areia, silte e argila do solo indicam que não houve diferença significativa em relação a textura do solo entre os tratamentos (Tabela 9).

Tabela 9 – Granulometria, do solo em sistema integrado de cafeeiro e fruteiras, com o uso de plantas de cobertura como braquiária, em diferentes profundidades de solo, Viçosa – MG

Tratamentos	AG	AF	Silte	Argila
	0 - 5 cm			
Braquiária	0,17	0,12	0,12	0,58
Amendoim forrageiro	0,18	0,13	0,14	0,54
Plantas espontâneas	0,18	0,12	0,11	0,60
5 - 10 cm				
Braquiária	0,15	0,12	0,12	0,59
Amendoim forrageiro	0,18	0,13	0,12	0,57
Plantas espontâneas	0,17	0,11	0,14	0,58
10 - 20 cm				
Braquiária	0,19	0,12	0,11	0,56
Amendoim forrageiro	0,16	0,11	0,14	0,58
Plantas espontâneas	0,15	0,11	0,13	0,61
20 - 40 cm				
Braquiária	0,15	0,14	0,13	0,57
Amendoim forrageiro	0,15	0,12	0,11	0,62
Plantas espontâneas	0,14	0,12	0,11	0,63

Obs: Areia grossa (AG) (Kg Kg^{-1}) e fina (AF) (Kg Kg^{-1}) determinadas por peneiramento; Silte e argila determinados pelo método da pipeta + agitação lenta (Kg Kg^{-1}). Metodologias segundo Teixeira et al. (2017).

4.7 Densidade do solo, densidade de partícula, microporosidade, macroporosidade e porosidade total

Os resultados em valores médios da densidade do solo (D_s) e de partícula (D_p), assim como a microporosidade (M_i), macroporosidade (M_a) e porosidade total (PT) estão na Tabela 10. Três anos após o início do experimento, não foi possível observar diferenças significativas em relação a esses atributos do solo.

Tabela 10 – Densidade e porosidade do solo em sistema integrado de cafeeiro e fruteiras, com o uso de plantas de cobertura, em diferentes profundidades de solo, Viçosa – MG

Tratamentos	Dp	Ds	Mi	Ma	PT
0 - 5 cm					
Braquiária	2,53	1,17	0,36	0,18	0,54
Amendoim forrageiro	2,52	1,20	0,41	0,11	0,52
Plantas espontâneas	2,54	1,15	0,39	0,15	0,55
5 - 10 cm					
Braquiária	2,57	1,20	0,41	0,12	0,52
Amendoim forrageiro	2,53	1,22	0,40	0,12	0,52
Plantas espontâneas	2,53	1,23	0,40	0,12	0,51
10 - 20 cm					
Braquiária	2,57	1,12	0,42	0,15	0,56
Amendoim forrageiro	2,67	1,23	0,43	0,11	0,54
Plantas espontâneas	2,50	1,16	0,40	0,14	0,54
20 - 40 cm					
Braquiária	2,55	1,18	0,43	0,11	0,54
Amendoim forrageiro	2,62	1,23	0,42	0,11	0,53
Plantas espontâneas	2,51	1,18	0,42	0,11	0,53

Obs: Densidade do solo (Ds) determinado pelo método do anel volumétrico (g cm^{-3}); Densidade de partículas (Dp) determinada pelo método do balão volumétrico (g cm^{-3}); Porosidade total (PT) determinado por $PT = (1 - Ds/Dp)$ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Microporosidade determinado pela mesa de tensão a 6Kpa ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Macroporosidade determinado por $Ma = PT - Mi$ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). Metodologias segundo Teixeira et al. (2017).

4.8 Capacidade de água disponível e curva de retenção de água no solo

De acordo com as condições e tempo desse experimento, não foram observadas diferenças significativas na CAD entre tratamentos em nenhuma das camadas avaliadas (Tabela 11). No perfil completo de 0–40 cm, a CAD foi de $26,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ na média dos tratamentos.

Tabela 11 - Capacidade de água disponível (CAD) em sistema integrado de cafeeiro e fruteiras, com o uso de plantas de cobertura como braquiária, amendoim forrageiro e plantas espontâneas, nas profundidades de 0-40 cm, Viçosa – MG

Profundidade	Tratamentos
--------------	-------------

(cm)	Braquiária	Amendoim forrageiro	Plantas Espontâneas
0 - 5	3,30	3,32	3,60
5 - 10	3,59	3,40	3,78
10 - 20	6,72	6,00	7,13
20 - 40	11,44	13,24	14,20
0 - 40	25,03	25,97	28,71

Obs: CAD ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$).

Os valores dos parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água (CRA) “ Θ_s ” e “ Θ_r ” (determinadas pelo método de Van Genuchten) apresentaram diferença significativa nas camadas de 0–5 cm e 10-20 cm, respectivamente (Tabela 12). o “ Θ_s ” foi superior no amendoim forrageiro em relação a braquiária, mas igual ao controle. Enquanto que, para o “ Θ_r ” as médias nos tratamentos com as plantas de cobertura foram iguais e diferentes estatisticamente do controle. Os valores de Θ_{CC} e Θ_{PMP} apresentaram diferenças significativas na camada de 10–20 cm. Sendo que, não houve diferença significativa entre as plantas de cobertura, mas sim entre braquiária e plantas espontâneas (Tabela 12).

Tabela 12 - Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água (CRA) pelo modelo de Van Genuchten e umidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) na tensão matricial de 10 kPa (Θ_{CC}) e 1500 kPa (Θ_{PMP}) em sistema integrado de cafeeiro e fruteiras, com o uso de plantas de cobertura como braquiária, amendoim forrageiro e plantas espontâneas, nas profundidades de 0-40 cm de solo, Viçosa – MG

Tratamentos	Parâmetros				Umidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	
	Θ_s	Θ_r	α	n	Θ_{CC}	Θ_{PMP}
0 - 5 cm						
Braquiária	0,35 b	0,20	0,00	1,26	0,34	0,28
Amendoim forrageiro	0,42 a	0,26	0,02	1,20	0,40	0,33
Plantas espontâneas	0,39 ab	0,25	0,01	1,36	0,37	0,30
5 - 10 cm						
Braquiária	0,40	0,26	0,01 b	1,16	0,39	0,32
Amendoim forrageiro	0,42	0,26	0,04 a	1,30	0,39	0,32
Plantas espontâneas	0,40	0,20	0,02 ab	1,15	0,38	0,30
10 - 20 cm						

Braquiária	0,40	0,27 a	0,02	1,17	0,40 ab	0,33 ab
Amendoim forrageiro	0,41	0,26 a	0,01	1,08	0,45 a	0,39 a
Plantas espontâneas	0,40	0,14 b	0,03	1,09	0,37 b	0,30 b
20 - 40 cm						
Braquiária	0,43	0,30	0,02	1,17	0,41	0,35
Amendoim forrageiro	0,42	0,22	0,02	1,13	0,40	0,34
Plantas espontâneas	0,42	0,26	0,01	1,17	0,40	0,33

Obs.: Θ_s é a umidade de saturação (m^3m^{-3}); Θ_r é a umidade residual (m^3m^{-3}); α e n são parâmetros empíricos de ajuste do modelo de Van Genuchten; $m = 1 - 1/n$. Letras minúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma profundidade. Médias seguidas por mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

4.9 Teores dos nutrientes e propriedades químicas do solo

Houve diferença significativa entre os tratamentos para o teor de P na camada de 0–5 cm de profundidade, com maior acúmulo do nutriente no tratamento com amendoim forrageiro (Tabela 13). Quando comparado ao controle com plantas espontâneas, foi obtido duas vezes mais P pela planta de cobertura. No entanto, em 5–10 cm de profundidade, o tratamento com amendoim forrageiro obteve média inferior aos demais tratamentos, que foram iguais entre si. Nas demais camadas não houve diferença entre os tratamentos.

Tabela 13 – Teores de nutrientes de um latossolo vermelho-amarelo em sistema integrado de cafeeiro e fruteiras, com o uso de plantas de cobertura como braquiária, amendoim forrageiro e plantas espontâneas, nas profundidades de 0-40 cm, Viçosa – MG

Tratamentos	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
	0 - 5 cm			
Braquiária	3,20 b	248,50 a	3,58	1,89 a
Amendoim forrageiro	5,70 a	185,50 b	3,47	1,54 b
Plantas espontâneas	2,60 b	101,30 c	3,14	1,44 b
5 - 10 cm				
Braquiária	3,40 a	134,50 a	3,06	1,36 a
Amendoim forrageiro	1,45 b	50,30 b	2,75	1,12 b
Plantas espontâneas	2,85 a	59,30 b	2,61	1,03 b
10 - 20 cm				
Braquiária	0,85	102,00 a	2,60	1,01

Amendoim forrageiro	1,10	45,70 b	2,52	0,92
Plantas espontâneas	1,20	46,70 b	2,17	0,80
20 - 40 cm				
Braquiária	0,75	79,50 a	1,78	0,65
Amendoim forrageiro	1,35	30,30 b	1,62	0,53
Plantas espontâneas	0,93	30,70 b	1,46	0,56

Obs: K e P disponíveis: extraídos com solução de Mehlich-1 (mg dm^{-3}); Ca^{2+} e Mg^{2+} extraídos com $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ (cmolc dm^{-3}); H+Al: extraídos com acetato de cálcio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, a pH 7,0 (cmolc dm^{-3}). Metodologias segundo Teixeira et al. (2017).

Para os teores de K^+ e Mg^{2+} , o tratamento com braquiária foi o que mais apresentou acúmulo no solo, sendo que para o primeiro nutriente as diferenças ocorreram em todas as camadas e, para o segundo, elas ocorreram nas camadas de 0–5 e 5–10 cm (Tabela 13). Nas diferentes profundidades do perfil do solo, as diferenças de K^+ entre braquiária e plantas espontâneas variaram de 2,2 a 2,6 vezes mais nutriente no solo com a planta de cobertura. Já para os teores de Mg^{2+} , a braquiária obteve valores cerca de 30% superior ao do tratamento controle nas duas profundidades de solo mais superficiais avaliadas.

Para os teores de Ca^{2+} , não houve diferença entre os tratamentos em nenhuma das camadas avaliadas. Do mesmo modo, para os atributos químicos como pH, P-rem, Al^{3+} , H+Al, SB, t, T, V e m não houveram diferenças significativas entre os tratamentos em nenhuma das profundidades do solo em estudo (Tabela 14).

Tabela 14 – Atributos químicos de um latossolo vermelho-amarelo em sistema integrado de cafeeiro e fruteiras, com o uso de plantas de cobertura como braquiária, amendoim forrageiro e plantas espontâneas, nas profundidades de 0-40 cm, Viçosa – MG

Tratamentos	pH H_2O	P-rem	H+Al	V	Al^{3+}	SB	t	T
		mg L^{-1}	mg dm^{-3}	%		$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$		
0 - 5 cm								
Braquiária	6,50	21,90	2,17	73,33	0,00	5,98	5,98	8,15
Amendoim forrageiro	6,12	21,53	2,53	68,13	0,00	2,53	5,41	7,94
Plantas espontâneas	6,31	19,63	2,27	68,10	0,00	4,84	4,84	7,11
5 - 10 cm								
Braquiária	6,73	12,70	1,50	75,90	0,00	4,70	4,70	6,20
Amendoim forrageiro	6,37	14,10	1,83	69,03	0,00	4,04	4,04	5,88

Plantas espontâneas	6,32	15,07	2,03	65,30	0,00	3,80	3,80	5,83
10 - 20 cm								
Braquiária	6,39	11,90	2,17	63,93	0,00	3,82	3,82	5,99
Amendoim forrageiro	6,14	13,37	1,97	64,40	0,00	3,56	3,56	5,53
Plantas espontâneas	6,20	10,70	1,87	62,23	0,00	3,08	3,08	4,95
20 - 40 cm								
Braquiária	6,04	8,77	2,23	54,30	0,00	2,58	2,58	4,82
Amendoim forrageiro	5,41	11,17	2,77	44,77	0,06	2,23	2,29	5,00
Plantas espontâneas	5,67	9,57	2,47	46,87	0,02	2,11	2,13	4,57

Obs: Potencial hidrogeniônico (pH) em água: determinado em solução 1:2,5 (solo-solução) por potenciometria; P-Rem: Fósforo remanescente extraído por CaCl_2 e determinado por absorção molecular (mg L^{-1}); Al^{3+} extraído com $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); H+Al: extraídos com acetato de cálcio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, a pH 7,0 (mg dm^{-3}); SB = soma de bases trocáveis ($\text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+}$) ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); T = capacidade de troca catiônica a pH 7,0, que é soma de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Al^{3+} e H ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); t = capacidade de troca catiônica efetiva, que é a soma de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Al^{3+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); V = saturação por bases $V(\%) = (100 \cdot \text{SB})/t$; m(%) = saturação por alumínio, em que $m = (100 \cdot \text{Al}^{3+})/(\text{SB} + \text{Al}^{3+})$. Metodologias segundo Teixeira et al. (2017).

5. DISCUSSÃO

5.1 Carbono e nitrogênio do solo

O carbono do solo está presente em diversos compartimentos da matéria orgânica, que influenciam na dinâmica de carbono do solo e são importantes para garantir a eficiência dos serviços ecossistêmicos, como o sequestro de C (Macías e Camps, 2010; Hoffland et al., 2020). Essa dinâmica é influenciada pelas condições do solo e depende das interações entre a fauna e a flora, como a relação entre os microrganismos do solo e as plantas (Sokol et al., 2022). O ambiente criado pela interação entre diferentes espécies de plantas, enriquecem a biodiversidade, que reflete em maior acúmulo de MOS e conseqüentemente, aumenta o estoque de C (Tumwebaze e Byakagaba, 2016; Steinfeld et al., 2023; Tonucci et al., 2023).

No presente estudo houve um incremento expressivo nos estoques de COS, C-MOP e C-MOAM na camada de 0–40 cm nos tratamentos com as plantas de cobertura, com as maiores diferenças ocorrendo na camada mais profunda avaliada de 20–40 cm (Tabela 4). Como nessa camada a contribuição dos resíduos de parte aérea podem ter pouca influência no acúmulo de COS e C-MOAM em curto espaço de tempo (três anos de experimento), sugere-se que houve maior contribuição das raízes para esse resultado. O mesmo ocorreu em um estudo feito por Sokol e Bradford (2019), em que as raízes demonstraram grande influência no aumento do C-MOAM, efeito atribuído a atividade microbiana em associação com as raízes.

O sistema radicular das plantas desempenha um papel importante no aumento do estoque de C no solo, especialmente por atingir elevadas profundidades (Mantovani et al., 2024). O potencial das raízes no sequestro de COS ocorre pelo aporte contínuo de resíduos diretamente na matriz do solo ou através de rizodeposições, que são formados pelos exsudatos radiculares. Açúcares, aminoácidos e ácidos orgânicos estão entre os seus principais constituintes, muito utilizados como fonte de energia para os microrganismos do solo (Panchal et al., 2022).

Além das frações mais estáveis, as plantas de cobertura tiveram grande impacto na alteração da fração mais sensível da MOS, sendo que o aumento proporcional do C-MOP foi aproximadamente cinco vezes maior que o C-MOAM nos tratamentos com as plantas de cobertura, em comparação ao controle (Tabela 4). Por ser uma fração mais sensível, o C-MOP está sujeito a alterações em um curto intervalo de tempo. Entretanto, o aumento de C-MOP é o caminho para o acúmulo de COS e C-MOAM ao longo do tempo (Briedis et al., 2018).

Embora a maior contribuição para o estoque total de C-MOP tenha vindo da camada de 20-40 cm para as plantas de cobertura nesse estudo, a camada de 0–5 cm também obteve alta proporção de C-MOP. Com diâmetro maior que 53 μm (estágio inicial do processo de decomposição), a principal contribuição no acúmulo de C-MOP vem da serapilheira. A maior proporção de C-MOP nos tratamentos com plantas de cobertura tem relação direta com a quantidade de resíduos deixados na superfície do solo pela braquiária e amendoim forrageiro (Sá et al., 2015). Esses resultados indicam que a adoção de plantas de cobertura na entrelinha do cafeeiro e a área terraceada, ao proporcionar uma cobertura permanente do solo com elevado aporte de resíduos, além de contribuir para a conservação do solo e da água, é uma excelente estratégia para o acúmulo de C no curto e longo prazo.

Nos trabalhos realizados por Carlos et al. (2023) e Pimentel et al. (2024) com o uso de plantas de cobertura em plantio direto, foram encontrados maiores estoques de C nas camadas mais superficiais. Do contrário, como foi observado por Xu et al., (2024) e pelo presente estudo, o cultivo de culturas de cobertura perenes foi capaz de aumentar o estoque de C em profundidade. Esse resultado foi evidenciado pelo acúmulo de C-MOAM em 20-40 cm. O aumento do estoque de C em profundidade pode ser uma estratégia mais eficiente de sequestrar carbono a longo prazo (Button et al., 2022). A composição diversificada de espécies em sistemas agrícolas, pode refletir na melhoria da qualidade do solo, até mesmo comparado a uma área de vegetação nativa (Tonucci et al., 2023).

O N é um dos nutrientes requerido em maiores quantidades pelas plantas. Ele faz parte de diversas funções vitais, como a síntese de proteínas e ácidos nucleicos que são fundamentais para seu crescimento, desenvolvimento e resistência a

condições de estresse (Nazir et al., 2023). Apesar da alta demanda, a maior fonte de N na natureza não é capaz de ser utilizada pela maioria das plantas, que é o N_2 . Por isso, a aplicação excessiva de fertilizantes nitrogenados é uma prática comum para muitos agricultores.

Essas aplicações externas geram grandes perdas de N por volatilização ou lixiviação, que podem causar danos ambientais severos como a contaminação da água e salinização do solo (Anas et al., 2020). Associado a essas perdas, também está o aumento das emissões de N_2O , que é um GEE com alto potencial de aquecimento (Thilakarathna et al., 2020).

Além de proteger o solo da erosão, plantas de cobertura podem trazer benefícios que variam de acordo com suas particularidades e o tipo de manejo ao qual estão associadas (Pimentel et al., 2024). Plantas leguminosas, são capazes de formar associações simbióticas com algumas bactérias (*Rhizobium spp*) e fixar o N presente na atmosfera (N_2), como o amendoim forrageiro do presente estudo (Liu, et al. 2018).

Nesse estudo, a camada mais superficial do solo obteve diferença significativa para o NT no tratamento com amendoim forrageiro (Tabela 5). Esse efeito traz vantagens significativas para o cafeeiro, que concentra sua maior absorção pelo sistema radicular na camada de 0-20 cm de solo (DaMatta, 2007). Assim como em 0-5 cm, 20-40 cm também demonstrou efeito significativo. Nessa camada, a média do teor de N para as plantas de cobertura foi 2,5 vezes maior para os tratamentos com as plantas de cobertura quando comparados ao controle.

Além da influência nos teores médios de N, as leguminosas podem alterar a relação C:N, o que influencia diretamente a atividade microbiana no solo e que também pode ser usado como um indicador da qualidade do solo (Bengtsson et al., 2003; Rousk e Bååth, 2007; Zinn et al., 2018; Negash et al., 2022). No presente estudo, a relação C:N nos três tratamentos não diferiu estatisticamente, ou seja, mesmo que o COT e o NT tenham apresentado diferença significativa em relação ao controle (Tabelas 5 e 6), a proporção entre os nutrientes foi mantida. Da mesma forma como observado por Zinn et al. (2018), embora seja possível usar a relação C:N como

indicador da qualidade do solo, este parâmetro sozinho não é determinante para a tomada de decisões relacionadas ao manejo em agroecossistemas.

5.2 Biomassa microbiana do solo

A mineralização do C no solo depende de fatores como a intensidade da atividade microbiana, disponibilidade e acessibilidade aos resíduos, assim como sua composição química (Wang et al., 2014). Compostos lábeis são de menor tamanho e de fácil decomposição, enquanto os recalcitrantes possuem tamanho maior e são formados por compostos de estruturas mais complexas, como a lignina (Rovira e Vallejo, 2002; Belay-Tedla et al., 2009).

Conforme indicado por Dou et al. (2023), o C lábil (CL) é a principal fonte de energia para os microrganismos do solo, por ser degradado facilmente. Sua origem está associada a biomassa microbiana (BM), ao carbono orgânico dissolvido e a necromassa microbiana (Sparling et al., 1998; Zhang et al., 2021). No presente estudo, houve efeitos positivos significativos nos tratamentos com as plantas de cobertura, tanto pelo aumento no teor do CL no solo quanto na maior expressão da BM, (tabela 7). Isso indica que a manutenção de plantas de cobertura perenes de forma contínua é essencial para a manutenção da qualidade biológica do solo. Além disso, o acúmulo e manutenção de compostos orgânicos lábeis no solo é um dos caminhos primordiais para o sequestro de C ao longo do tempo em sistemas conservacionistas (Briedis et al., 2023).

No trabalho desenvolvido por Carlos et al. (2023) foi encontrado maior atividade microbiana no solo onde havia culturas de cobertura em plantio direto, efeito atribuído ao não revolvimento do solo, a proteção do solo pelas culturas de cobertura e a atividade do sistema radicular dessas plantas. Resultados semelhantes foram encontrados por Acharya et al. (2024), que observou maior abundância microbiana no solo e aumento da atividade enzimática em área com plantas de cobertura. Bastos et al. (2023), estudou a atividade enzimática da comunidade microbiana no solo em um café cultivado em SAF e verificaram que a adoção do SAF permitiu maior expressão da BM e da sua atividade enzimática.

Além de ser um caminho para o aumento do COS, frações lábeis de C no solo também atuam como protetores da MOS. Na ausência ou na limitada quantidade desses compostos mais facilmente utilizáveis, os microrganismos podem começar a

degradar estruturas já estabilizadas, como a MOS nativa. Esse processo, conhecido como efeito priming (EP) positivo, eleva a respiração basal do solo (RBS) (Bernard et al., 2022; Shi et al., 2023; Sun et al., 2023).

A RBS consiste nas emissões de CO₂ do solo para a atmosfera, decorrente da atividade microbiana e da respiração das raízes (Kotroczo et al., 2023). A RBS junto ao C microbiano (C_{mic}) dão origem ao quociente metabólico do solo (qCO₂) (Anderson e Domsch, 1993). O qCO₂ associa a produção de CO₂ ao conteúdo de BM por unidade de tempo, por isso, pode ser utilizado como um indicador da eficiência de uso do substrato pela comunidade microbiana no solo (De Araújo e Monteiro, 2007; Blagodatskaya, 2014).

Nesse estudo, o tratamento com o amendoim forrageiro resultou em maior qCO₂ (figura 2). Esse aumento em qCO₂ não foi acompanhado pelo incremento de Caq (tabela 7), então, houve uma maior produção de CO₂ que não foi acompanhado pelo crescimento da BM. Esse resultado pode estar associado a condições de estresse para os microrganismos, que liberaram mais C para a atmosfera do que foram capazes de incorporar (Wardle e Ghani, 1995).

O quociente microbiano (q_{Mic}) expressa, em porcentagem, a razão entre o C microbiano (C_{mic}) e o COT (Blagodatskaya, 2014). Ou seja, o quanto do C total do solo corresponde a fração microbiana. Nesse estudo o q_{Mic} foi maior para o tratamento com braquiária (figura 3), ou seja, houve maior expressão da BM em relação ao COT nesse tratamento.

Por serem muito sensíveis a mudanças no ambiente, esses atributos são muito utilizados como indicadores da qualidade ou saúde do solo (Tonon-Debiasi et al., 2024). Portanto, esse resultado sugere que comparado aos demais tratamentos, em relação ao q_{Mic}, a braquiária foi mais eficiente em melhorar a saúde do solo, como descrito por Lemanowicz et al. (2020) e De Lacerda et al. (2023).

Estudos como o de Tonon-Debiasi et al. (2024) que comparam culturas de cobertura com atributos físicos e biológicos do solo, salientam a importância das raízes para mudanças positivas na vida microbiana do solo. Exsudatos radiculares, a

constante renovação do sistema radicular e a ciclagem de nutrientes feita pelas raízes, são fundamentais para manter ou melhorar a saúde no solo.

5.3 Atributos físicos

Oferecer um ambiente propício para o desenvolvimento saudável das plantas, faz parte dos serviços ecossistêmicos prestado pelos solos (Rillig et al., 2023). Características como a densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), microporosidade (Mi) e macroporosidade (Ma) podem ser utilizados como indicadores físicos da qualidade do solo, já que são importantes para o bom funcionamento desses serviços e podem sofrer modificações de acordo com o manejo (De Corato et al., 2024).

Como descrito por Pessoa et al. (2024), algumas práticas de manejo que envolvem a exposição do solo e intenso revolvimento, prejudicam a sua estrutura, comprometem a capacidade de armazenar água e de oferecer suporte para o desenvolvimento das raízes das plantas. Como consequência, predispõe esses solos ao risco de erosão. A porosidade é o atributo que mais influência no movimento da água no solo. Os microporos são responsáveis pela retenção da água, enquanto os macroporos por sua drenagem (Haruna et al., 2020). Além de ser essencial para as plantas, a água no solo também influencia a atividade microbiana, a disponibilidade de nutrientes, os processos erosivos e até mesmo a sua formação (Lin, 2011).

A utilização de plantas de cobertura pode ser um aliado importante para melhorar os atributos físicos do solo (Haruna et al., 2020). Entretanto, no presente estudo não foram observadas diferenças entre os tratamentos para a densidade e porosidade do solo. Isso pode ter ocorrido pelo curto tempo do experimento. Melo et al., 2024 em experimentos de longa duração (entre 9 e 16 anos) no estado da Paraíba, observou que a implantação de plantas de cobertura em SAF diminuiu a densidade do solo e aumentou a porosidade total. Essas mudanças podem melhorar o desenvolvimento das plantas e aumentar a capacidade de retenção de água no solo, além de remover contaminantes na água e dessa forma, melhorar a sua qualidade (François et al., 2023).

A água disponível para as plantas, outro atributo físico importante de qualidade do solo, está entre a capacidade de campo (Θ_{cc}) e o ponto de murcha permanente (Θ_{PMP}). Semelhante ao encontrado por Soares et al. (2021), no presente estudo houve diferença significativa entre os tratamentos em relação a Θ_{cc} nas camadas de 0-5 e 10-20 cm. Em ambas profundidades, o tratamento com amendoim forrageiro se sobressaiu, o que indica um aumento na capacidade de retenção de água no solo na Θ_{cc} . No sul da Amazônia, o trabalho de Soares et al. (2021) foi com gramíneas e leguminosas como culturas de cobertura, com o objetivo de verificar as mudanças em relação aos atributos físicos do solo em três anos de avaliação. Para as condições do estudo de clima quente e úmido, foram encontradas melhores respostas nos tratamentos com as gramíneas. Esse efeito foi atribuído ao grande volume de matéria seca produzido pela *Urochloa brizhanta*.

As raízes são capazes de aumentar a infiltração de água no solo e com isso, podem aumentar a capacidade de reter água em camadas mais profundas. Embora não tenha sido encontrado efeito significativo para a capacidade de água disponível nesse estudo, outros estudos mostram que as culturas de cobertura são aliadas no armazenamento de água no solo, na redução da densidade e no aumento dos macroporos (Blanco-Canqui e Ruis, 2020).

Segundo Didoné et al. (2017), a erosão hídrica é a principal causa de perdas de solo no Brasil. Sistemas de manejo que proporcionam boa cobertura do solo, o mantêm mais protegido e evitam perdas de solo que também geram perdas de água, nutrientes e C (Dambros et al., 2024; Rocha et al., 2024). Além disso, também são eficientes para aumentar a produção de alimentos, reduzir os GEE e aumentar a saúde do solo (Yang et al., 2024).

5.4 Atributos químicos

O custo com adubação é um dos maiores gargalos da produção cafeeira no Brasil, tanto pela aquisição de insumos quanto pelos gastos com a mão de obra (Custódio et al., 2023). Aliado a isso, a adubação com fertilizantes sintéticos é um dos componentes que mais emite GEE na agropecuária, atrás apenas da criação de gado (Potenza et al., 2021).

A capacidade dessas plantas em melhorar a fertilidade do solo está atrelado a dois mecanismos importantes. O amendoim forrageiro, planta leguminosa, através de associações com rizóbios no solo, fazem a fixação biológica de N. Mas além disso, ambas são capazes de fazer a ciclagem de nutrientes. Essas plantas utilizam o nutriente em seu metabolismo e quando senescem, são decompostas pelos microrganismos do solo. Pela ação deles, ocorre a liberação dos nutrientes que podem fazer parte do ciclo de vida do próprio microrganismo, de outros organismos presentes no solo ou ainda da MOS (Shi et al., 2023).

Em ecossistemas naturais, a ciclagem de nutrientes é a chave para a sobrevivência das plantas (Hobbie, 1992). Quanto maior a diversidade do sistema, maior riqueza na disponibilidade de nutrientes e melhor a exploração do solo em diferentes profundidades. Além disso, proporciona diversificação na composição dos resíduos e permite que haja resíduo no solo por mais tempo (Collier et al., 2011; Sun et al., 2023).

Neste estudo, o tratamento com as plantas de cobertura demonstrou ser eficiente para melhorar a qualidade química do solo. Os teores de nutrientes como N, P, K e Mg foram maiores nas parcelas em que o café foi cultivado com as plantas de cobertura. Leguminosas e gramíneas são muito utilizadas como plantas de cobertura, pela elevada produção de fitomassa (Collier et al., 2011). Entretanto, assim como ocorreu no presente estudo, Volf et al. (2023) e Arruda et al. (2023) observaram que enquanto as leguminosas estão mais associadas a ciclagem de N, as gramíneas se associam a ciclagem de K.

As gramíneas possuem sistema radicular profundo e são capazes de absorver o K trocável em maiores profundidades no solo. Além disso, as gramíneas são capazes de absorver uma fração de K não trocável, graças a exsudação de ácidos orgânicos que solubilizam o K que está ligado às argilas e normalmente não podem ser absorvidos pelas plantas cultivadas (Volf et al., 2018). Essas características das gramíneas podem explicar em parte o efeito dos maiores teores de K no tratamento com braquiária, em todas as profundidades avaliadas. Entretanto, convém mencionar que os valores de K foram superiores ao esperado em todos os tratamentos. Isso pode ter ocorrido em decorrência de adubações potássicas no cafeeiro (projeção da copa), influenciando o resultado encontrado na entrelinha onde se encontravam as plantas de cobertura.

Em relação a ciclagem do Mg, no trabalho de Arruda et al. (2023) também foram encontrados resultados semelhantes, superior no tratamento com as gramíneas como plantas de cobertura. Porém, no mesmo estudo foi verificada associação entre gramíneas e ciclagem de P, o que não foi verificado no presente estudo. Neste estudo o amendoim forrageiro demonstrou ser a planta de cobertura mais eficiente na ciclagem do P. Isso pode ser explicado por um mecanismo relatado em trabalho de Liu et al. (2018). O P é fundamental para a fixação do N₂, pois, a associação entre as raízes da planta e as bactérias fixadoras de N provocam nodulações nas raízes que são dependentes do P. Para aumentar a eficiência da nodulação, as leguminosas junto a essas bactérias, desenvolveram mecanismos específicos para ciclar o P.

Além dos benefícios econômicos, como diminuir a necessidade de adubação, as plantas de cobertura também ajudam a evitar a salinização de corpos d'água. Isso acontece tanto pela menor necessidade de aplicação de adubos sintéticos salinos, quanto pela proteção do solo contra erosão (Getahun e Keefer, 2023).

6. CONCLUSÃO

As plantas de cobertura foram eficientes em aumentar o estoque de carbono no solo, especialmente em camadas mais profundas do solo onde a atividade microbiana é menor e, por isso, a matéria orgânica do solo está mais protegida da degradação. Do mesmo modo, as plantas de cobertura também foram eficientes em aportar N ao solo, tanto pela fixação biológica, como pela ciclagem de nutrientes.

O C lábil na área de plantas de cobertura foi maior, o que pode ser explicado pelo aumento na quantidade e qualidade dos resíduos dessas plantas, que refletiu em aumento da biomassa microbiana. O tratamento com braquiária propiciou melhores condições para esse ganho, evidenciado pelo maior quociente microbiano. A biomassa microbiana associada ao amendoim forrageiro, não foi eficiente no uso do substrato, já que aumentou o quociente metabólico do solo.

Atributos físicos demoram para sofrerem mudanças com o manejo, por isso, nas condições de curta duração desse estudo não foram verificadas diferenças. Enquanto isso, os atributos químicos obtiveram resultados promissores pelo aumento nos teores de K, Mg e P na área das plantas de cobertura. O amendoim forrageiro contribuiu com o aumento em N e P, enquanto a braquiária aumentou os teores de Mg e K.

Esses resultados indicam que as plantas de cobertura são uma estratégia eficaz para melhorar a qualidade do solo e reduzir a dependência de insumos externos. Todos esses benefícios corroboram com as práticas de manejo e conservação do solo e salientam a importância da agricultura na mitigação às consequências das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

ACHARYA, Pramod; GHIMIRE, Rajan; ACOSTA-MARTÍNEZ, Veronica. Cover crop-mediated soil carbon storage and soil health in semi-arid irrigated cropping systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 361, p. 108813, 2024.

ANAS, Muhammad et al. Fate of nitrogen in agriculture and environment: agronomic, eco-physiological and molecular approaches to improve nitrogen use efficiency. **Biological Research**, v. 53, n. 1, p. 1-20, 2020.

ANDERSON, Traute-Heidi; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil biology and biochemistry**, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993.

ARRUDA, Everton Martins et al. Cover plants can contribute on macronutrient accumulation in agroforestry systems during off-season. **Agroforestry Systems**, p. 1-10, 2023.

ASHRAF, M. N.; WAQAS, M. A.; RAHMAN, S. Microbial metabolic quotient is a dynamic indicator of soil health: Trends, implications and perspectives. **Eurasian Soil Science**, v. 55, n. 12, p. 1794-1803, 2022.

BELAY-TEDLA, Asfaw et al. Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tallgrass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 1, p. 110-116, 2009.

BENGTSSON, Göran; BENGTSON, Per; MÅNSSON, Katarina F. Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, n. 1, p. 143-154, 2003.

BERNARD, Laetitia et al. Advancing the mechanistic understanding of the priming effect on soil organic matter mineralisation. **Functional Ecology**, v. 36, n. 6, p. 1355-1377, 2022.

BLAGODATSKAYA, Evgenia et al. Microbial growth and carbon use efficiency in the rhizosphere and root-free soil. **PloS one**, v. 9, n. 4, p. e93282, 2014.

BLANCO-CANQUI, Humberto; RUIS, Sabrina J. Cover crop impacts on soil physical properties: A review. **Soil Science Society of America Journal**, v. 84, n. 5, p. 1527-1576, 2020.

BREMNER, John M.; MULVANEY, C. S. Nitrogen—total. **Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties**, v. 9, p. 595-624, 1983.

BRIEDIS, Clever et al. How does no-till deliver carbon stabilization and saturation in highly weathered soils?. **Catena**, v. 163, p. 13-23, 2018.

BRIEDIS, Clever et al. Preservation of labile organic compounds is the pathway for carbon storage in a 23-year continuous no-till system on a Ferralsol in southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 33, p. e00643, 2023.

BUTTON, Erik S. et al. Deep-C storage: Biological, chemical and physical strategies to enhance carbon stocks in agricultural subsoils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 170, p. 108697, 2022.

CAMBARDELLA, Cynthia A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil science society of America journal**, v. 56, n. 3, p. 777-783, 1992.

CARLOS, Filipe Selau et al. Long-term cover crops and no-tillage in Entisol increase enzyme activity and carbon stock and enable the system fertilization in southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 34, p. e00700, 2023.

CHATAUT, Gopi et al. Greenhouse gases emission from agricultural soil: A review. **Journal of Agriculture and Food Research**, p. 100533, 2023.

CHIOREAN, Vasile-Florin. Determination of matric suction and saturation degree for unsaturated soils, comparative study-numerical method versus analytical method. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2017. p. 032074.

COLLIER, Leonardo Santos et al. Consórcio e sucessão de milho e feijão-de-porco como alternativa de cultivo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, p. 306-313, 2011.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento (2023). Acompanhamento da safra brasileira, Boletim Café, 10(3). Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>. Acesso em: 11 de dez. 2023.

CULMAN, Steven W. et al. Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 2, p. 494-504, 2012.

CUSTÓDIO, Felipe Varize et al. Análise dos custos de produção do café arábica nas regiões polos do Brasil. **Revista de Contabilidade do Mestrado em Ciências Contábeis da UERJ**, v. 26, n. 1, p. 121-136, 2023.

DAMATTA, Fábio M. et al. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian journal of plant physiology**, v. 19, p. 485-510, 2007.

DAMBROS, Liana et al. Soil loss and runoff in southern Brazil in conservation systems: a long-term experiment. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 46, n. 1, p. e63164-e63164, 2024.

DE ARAÚJO, Ademir Sérgio Ferreira; MONTEIRO, Regina Teresa Rosim. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 3, 2007.

DE CORATO, U., Viola, E., Keswani, C., & Minkina, T. Impact of the sustainable agricultural practices for governing soil health from the perspective of a rising agri-based circular bioeconomy. **Applied Soil Ecology**, v. 194, p. 105199, 2024.

DE LACERDA, Nilda Braga et al. Organic matter pools in a fluvisol after 29 years under different land uses in an irrigation region in northeast Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 208, p. 104861, 2023.

DE MORAES SÁ, João Carlos et al. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in Oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 26, n. 6, p. 531-543, 2015.

DIDONÉ, Elizeu Jonas; MINELLA, Jean Paolo Gomes; EVRARD, Olivier. Measuring and modelling soil erosion and sediment yields in a large cultivated catchment under no-till of Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 174, p. 24-33, 2017.

DONAGEMMA, Guilherme Kangussú et al. Manual de métodos de análise de solo. 2011.

DOS SANTOS BASTOS, Tatiana Reis et al. Response of soil microbial biomass and enzyme activity in coffee-based agroforestry systems in a high-altitude tropical climate region of Brazil. **Catena**, v. 230, p. 107270, 2023.

DOU, Yanxing; LIAO, Jiaojiao; AN, Shaoshan. Importance of soil labile organic carbon fractions in shaping microbial community after vegetation restoration. **Catena**, v. 220, p. 106707, 2023.

ECKARDT, Nancy A. et al. Climate change challenges, plant science solutions. **The Plant Cell**, v. 35, n. 1, p. 24-66, 2023.

EDEN, Marie; GERKE, Horst H.; HOUOT, Sabine. Organic waste recycling in agriculture and related effects on soil water retention and plant available water: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 37, p. 1-21, 2017.

FERREIRA, Eric Batista; CAVALCANTI, Portya Piscitelli; NOGUEIRA, Denismar Alves. ExpDes.pt: Pacote experimental designs (Portuguese). R package version 1.2.0, 2018. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt> . Acesso em: 09 de out. 2023.

FRANCAVIGLIA, Rosa; ALMAGRO, María; VICENTE-VICENTE, José Luis. Conservation agriculture and soil organic carbon: principles, processes, practices and policy options. **Soil Systems**, v. 7, n. 1, p. 17, 2023.

FRANÇOIS, Mathurin et al. Impacts of cacao agroforestry systems on climate change, soil conservation, and water resources: a review. **Water Policy**, 2023.

GARBA, Ismail I.; BELL, Lindsay W.; CHAUHAN, Bhagirath S.; WILLIAMS, Alwyn. Optimizing ecosystem function multifunctionality with cover crops for improved agronomic and environmental outcomes in dryland cropping systems. **Agricultural Systems**, v. 214, p. 103821, 2024.

GETAHUN, Elias; KEEFER, Laura L. Assessing the Effectiveness of Winter Cover Crops for Controlling Agricultural Nutrient Losses. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 59, n. 3, p. 510-522, 2023.

GHANI, Anwar; DEXTER, Moira; PERROTT, K. W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. **Soil biology and biochemistry**, v. 35, n. 9, p. 1231-1243, 2003.

HARUNA, Samuel I. et al. Improving soil physical properties through the use of cover crops: A review. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 3, n. 1, p. e20105, 2020.

HAYNES, R. J., & FRANCIS, G. S. (1993). Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions. **Journal of Soil Science**, 44(4), 665-675.

HILLEL, Daniel. **Introduction to environmental soil physics**. Elsevier Academic Express, 2003.

HOBBIE, Sarah E. Effects of plant species on nutrient cycling. **Trends in ecology & evolution**, v. 7, n. 10, p. 336-339, 1992.

HOFFLAND, Ellis et al. Eco-functionality of organic matter in soils. **Plant and Soil**, v. 455, p. 1-22, 2020.

JAIN, P. C. Greenhouse effect and climate change: scientific basis and overview. **Renewable energy**, v. 3, n. 4-5, p. 403-420, 1993.

JANZEN, H. H. Carbon cycling in earth systems—a soil science perspective. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 104, n. 3, p. 399-417, 2004.

JÚNIOR, AS de A. et al. DETERMINAÇÃO da curva de retenção de água no solo em laboratório. 2007.

KIEHL, Edmar José. **Manual de Edafologia; relações solo-planta**. Ceres, 1979.

KOTROCZÓ, Zsolt et al. Long-term changes in organic matter content and soil moisture determine the degree of root and soil respiration. **Plants**, v. 12, n. 2, p. 251, 2023.

LEHMANN, Johannes; KLEBER, Markus. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, v. 528, n. 7580, p. 60-68, 2015.

LEMANOWICZ, Joanna et al. Activity of selected enzymes and phosphorus content in soils of former sulphur mines. **Science of The Total Environment**, v. 708, p. 134545, 2020.

LI, Linyang; CHEN, Peng; WANG, Kaili; ZHANG, Rungin; YUAN, Xiaoliang; GE, Le; LI, Qian; LIU, Yi; ZHANG, Xiaoquan; LI, Zhiguo. Gramineae-legumes mixed planting effectively reduces soil and nutrient loss in orchards. **Agricultural Water Management**, v. 289, p. 108513, 2023.

LIN, Henry. Three principles of soil change and pedogenesis in time and space. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, n. 6, p. 2049-2070, 2011.

LIU, Ailin et al. Interaction and regulation of carbon, nitrogen, and phosphorus metabolisms in root nodules of legumes. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 1860, 2018.

MACÍAS, Felipe; CAMPS ARBESTAIN, Marta. Soil carbon sequestration in a changing global environment. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 15, p. 511-529, 2010.

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

MASSON-DELMOTTE, V. P. et al. Ipcc, 2021: Summary for policymakers. in: Climate change 2021: The physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. 2021.

MELO, David Marx Antunes de et al. Soil Quality Indicators in Peasant Agroecosystems in Paraíba State, Brazil. **Tropical Conservation Science**, v. 17, p. 19400829231215492, 2024.

MENDONÇA, Eduardo & MATOS, Eduardo. **Matéria orgânica do solo: Métodos de análises**, 2017.

NAZIR, Faroza et al. Sustaining nitrogen dynamics: A critical aspect for improving salt tolerance in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1087946, 2023.

NEGASH, Mesele; KASEVA, Janne; KAHILUOTO, Helena. Determinants of carbon and nitrogen sequestration in multistrata agroforestry. **Science of The Total Environment**, v. 851, p. 158185, 2022.

NGUYEN, Trung Thanh et al. Security risks from climate change and environmental degradation: implications for sustainable land use transformation in the Global South. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 63, p. 101322, 2023.

PANCHAL, Poonam et al. Soil carbon sequestration by root exudates. **Trends in Plant Science**, 2022.

PESSOA, Thaís N. et al. Influence of intensive cropping of vegetables on physical and hydraulic properties and functions of an Oxisol in the Brazilian Cerrado. **Catena**, v. 235, p. 107651, 2024.

PIMENTEL, Marcelo Laranjeira et al. Quantity, quality and physical protection of soil carbon associated with sugarcane straw removal in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 237, p. 105976, 2024.

POTENZA, R. F. et al. Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2021. **Observatório do Clima**, 46, 2021.

REHBERGER, Emily et al. What climate and environmental benefits of regenerative agriculture practices? an evidence review. **Environmental Research Communications**, 2023.

RIBEIRO, Antonio Carlos; GUIMARÃES, P. T. G. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais-5a. aproximação**. Comissão de fertilidade do solo do estado de Minas Gerais, 1999.

RIBEIRO, Luiz Carlos De Santana et al. Structural decomposition analysis of Brazilian greenhouse gas emissions. **World Development Sustainability**, v. 2, p. 100067, 2023.

RILLIG, Matthias C. et al. Increasing the number of stressors reduces soil ecosystem services worldwide. **Nature Climate Change**, v. 13, n. 5, p. 478-483, 2023.

RITCHIE, H.; ROSER, M. Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?. *Our World in data*. 2023. Disponível em: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>. Acesso em: 02 de jan. 2024.

RODRIGUEZ, Carolina et al. Grain legume-cereal intercropping enhances the use of soil-derived and biologically fixed nitrogen in temperate agroecosystems. A meta-analysis. **European Journal of Agronomy**, v. 118, p. 126077, 2020.

ROCHA, Paulo Roberto Ribeiro et al. Cover crops on soil quality and yield of cowpea under no-tillage in the Amazon savanna. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 46, n. 1, p. e62853-e62853, 2024.

ROUSK, Johannes; BÅÅTH, Erland. Fungal and bacterial growth in soil with plant materials of different C/N ratios. **FEMS microbiology ecology**, v. 62, n. 3, p. 258-267, 2007.

ROVIRA, Pere; VALLEJO, V. Ramón. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach. **Geoderma**, v. 107, n. 1-2, p. 109-141, 2002.

SHAW, Roger J.; YULE, D. F. **The assessment of soils for irrigation, Emerald, Queensland**. Brisbane: Queensland Department of Primary Industries, n. 13, 1978.

SHI, Jingwei et al. Soil labile organic carbon fractions mediate microbial community assembly processes during long-term vegetation succession in a semiarid region. **iMeta**, v. 2, n. 4, p. e142, 2023.

SOARES, Matheus Bortolanza et al. Use of cover crops in the southern Amazon region: What is the impact on soil physical quality?. **Geoderma**, v. 384, p. 114796, 2021.

SOKOL, Noah W.; BRADFORD, Mark A. Microbial formation of stable soil carbon is more efficient from belowground than aboveground input. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 1, p. 46-53, 2019.

SOKOL, Noah W. et al. Life and death in the soil microbiome: how ecological processes influence biogeochemistry. **Nature Reviews Microbiology**, v. 20, n. 7, p. 415-430, 2022.

SPARLING, Graham P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Soil Research**, v. 30, n. 2, p. 195-207, 1992.

SPARLING, G.; VOJVODIĆ-VUKOVIĆ, Maja; SCHIPPER, L. A. Hot-water-soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: the relationship with microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 30, n. 10-11, p. 1469-1472, 1998.

STEINFELD, Jonas 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.

SUN, Lijuan et al. Species of fast bulk-soil nutrient cycling have lower rhizosphere effects: A nutrient spectrum of rhizosphere effects. **Ecology**, v. 104, n. 4, p. e3981, 2023.

TEAM, RStudio. RStudio: Integrated Development for R. PBC, Boston, MA. Disponível em: <http://www.rstudio.com/>. Acesso em: 09 out. 2023.

TEDESCO, Marino José et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: UFRGS, v. 5, p. 174, 1995.

TEIXEIRA, Paulo César et al. Manual de métodos de análise de solo. 3 ed., 574p., 2017.

THILAKARATHNA, Shakila K. et al. Nitrous oxide emissions and nitrogen use efficiency in wheat: Nitrogen fertilization timing and formulation, soil nitrogen, and weather effects. **Soil Science Society of America Journal**, v. 84, n. 6, p. 1910-1927, 2020.

TIAN, Peng et al. Response of soil erosion to vegetation restoration and terracing on the Loess Plateau. **Catena**, v. 227, p. 107103, 2023.

Tonon-Debiasi, B. C., Debiasi, H., Rondina, A. B. L., de Moraes, M. T., Franchini, J. C., Junior, A. A. B., Hungria, M. & Nogueira, M. A. (2024). Microbial attributes as structural quality index for physical health of an Oxisol under compaction levels. **Soil and Tillage Research**, 235, 105872.

TONUCCI, Rafael Gonçalves et al. Agroforestry system improves soil carbon and nitrogen stocks in depth after land-use changes in the Brazilian semi-arid region. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, p. e0220124, 2023.

TUMWEBAZE, Susan Balaba; BYAKAGABA, Patrick. Soil organic carbon stocks under coffee agroforestry systems and coffee monoculture in Uganda. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 216, p. 188-193, 2016.

USDA - United States Department of Agriculture: Foreign Agricultural Service (2023). Coffee: World Markets and Trade. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/coffee.pdf>. Acesso em 11 de dez de 2023.

USUGA, Juan Carlos Loaiza et al. Estimation of biomass and carbon stocks in plants, soil and forest floor in different tropical forests. **Forest Ecology and Management**, v. 260, n. 10, p. 1906-1913, 2010.

VELDKAMP, Edzo. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 1, p. 175-180, 1994.

VOLF, Marcelo Raphael et al. Potassium dynamics in ruzigrass rhizosphere. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, 2018.

VOLF, Marcelo R. et al. Unraveling the role of ruzigrass in soil K cycling in tropical cropping systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, p. 1-14, 2023.

WANG, Qingkui et al. Fresh carbon and nitrogen inputs alter organic carbon mineralization and microbial community in forest deep soil layers. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 72, p. 145-151, 2014.

WANG, Ziwei et al. Development of pedotransfer functions for predicting hydraulic parameters of van Genuchten model by incorporating environmental variables on the Qinghai-Tibet Plateau. **Soil and Tillage Research**, v. 236, p. 105952, 2024.

WARDLE, D. A.; GHANI, and A. A critique of the microbial metabolic quotient (qCO₂) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 27, n. 12, p. 1601-1610, 1995.

XU, Yi et al. Long-term rotational and perennial cropping benefit soil organic carbon stocks and ecosystem multifunctionality. **Industrial Crops and Products**, v. 209, p. 117980, 2024.

YANG, Xiaolin et al. Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 198, 2024.

YEOMANS, Jane C.; BREMNER, John Michael. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.

ZHANG, Kaile; MALTAIS-LANDRY, Gabriel; LIAO, Hui-Ling. How soil biota regulate C cycling and soil C pools in diversified crop rotations. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 156, p. 108219, 2021.

ZINN, Yuri Lopes; MARRENJO, Gonçalves Jotamo; SILVA, Carlos Alberto. Soil C: N ratios are unresponsive to land use change in Brazil: A comparative analysis. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 255, p. 62-72, 2018.