ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO EM SISTEMA AGROFLORESTAL DE PRODUÇÃO DE CAFÉ NO SUL DE MINAS GERAIS

Palavras-Chave: ESTOQUE DE CARBONO; COMPACTAÇÃO DO SOLO; *Coffea arabica*

Autores(as):

VÍTOR HUGO SILVA BATISTA, FEAGRI – UNICAMP

Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA (orientador), FEAGRI – UNICAMP

M.sc EURIANA MARIA GUIMARÃES (coorientadora), FEAGRI – UNICAMP

INTRODUÇÃO:

Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) surgem como alternativa viável para promover a sustentabilidade da cafeicultura, contribuindo para a conservação do solo, melhoria da produtividade e da qualidade dos grãos, por meio da criação de microclima favorável (GOMES et al., 2020). Segundo o ICRAF, SAFs integram culturas agrícolas e espécies lenhosas perenes em arranjos espaço-temporais específicos (NAIR et al., 2010), atuando como sumidouros de carbono e reservas de biodiversidade, essenciais frente às mudanças climáticas (FAHAD et al., 2022).

O IPCC (2022) destaca o potencial dos solos agrícolas no sequestro de carbono, que pode variar de 0,4 a 8,6 Gt CO_2 eq. por ano, exigindo mudanças em larga escala nas práticas de manejo. No Brasil, o Programa Agricultura de Baixo Carbono (ABC), liderado pela EMBRAPA, tem promovido alternativas como a integração lavoura-pecuária-floresta, SAFs e plantio direto (VANOLLI et al., 2025). Em ecossistemas naturais, a matéria orgânica do solo apresenta equilíbrio nos ciclos de carbono (C) e nitrogênio (N), o que pode ser afetado pela adoção de SAFs (BORTOLON *et al.*, 2009).

Portanto, precisa que essas tecnologias sejam capazes de integrar ações antrópicas e ambientais, evitando tanto a degradação das terras como a exploração desordenada da floresta, podendo melhorar a renda dos produtores, portanto esse projeto tem como objetivo estudar os sistemas agroflorestais com diferentes espécies arbóreas na produção de café em comparação ao monocultivo analisando a qualidade estrutural do solo nesses diferentes sistemas na região sul de Minas Gerais, na cidade de Careaçu.

METODOLOGIA:

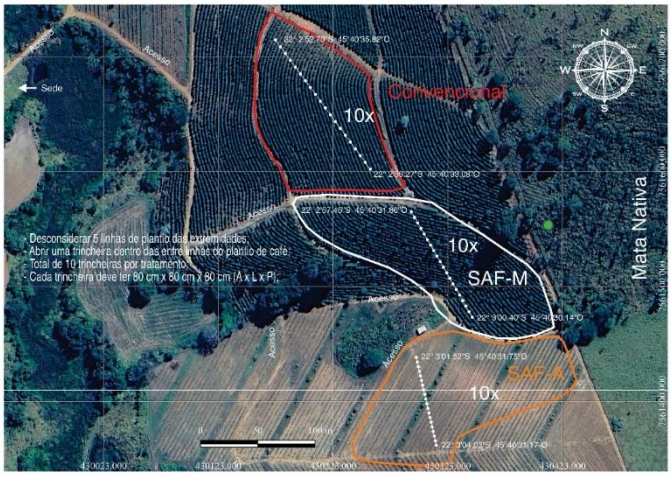
Este projeto de Iniciação Científica está vinculado à tese de doutorado de Euriana Maria Guimarães, contribuindo com análises de densidade do solo, teor e estoque de carbono e nitrogênio do solo. As coletas foram realizadas em 2024 pela equipe do Laboratório de Solos da FEAGRI.

O estudo ocorreu na Fazenda Pedra Preta, em Careaçu (MG), localizada a 22°2’ de latitude sul e 45°40’ de longitude oeste, em um Nitossolo Vermelho distrófico. O clima da região é subtropical (Cfa), com verões quentes, chuvas acima de 10 mm no mês mais seco, média anual de 17,3 °C e precipitação de 1.500 mm. O relevo é forte ondulado a montanhoso, com vegetação nativa de Floresta Estacional Semidecídua inserida no Bioma Mata Atlântica, na bacia do Rio Sapucaí.

A descrição experimental foi uma coleta realizada em 20 pontos na área de aproximadamente 1,0 ha de cada tratamento, sendo três tratamentos, totalizando 60 pontos dentro de 3,0 ha, no qual foram avaliados os seguintes sistemas (Figura 1): 1 - SAF Mantiqueira com colheita manual (SAF-M), sistema agroflorestal espaçado a cada 12,0 m com plantio de arbóreas dentro das linhas de produção de café (*Coffea arabica*); 2 - SAF Aleia com colheita mecanizada (SAF-A), sistema agroflorestal com linhas de

arbóreas a cada 48,6 m na produção de café (*Coffea arabica*); e 3 - Preparo convencional, com o monocultivo de café (*Coffea arabica*).

Figura 1. Localização da área experimental na Fazenda Pedra Preta em Careaçu, Minas Gerais, Brasil. Os sistemas agroflorestais representado pelo SAF Mantiqueira e SAF Aleia e o sistema convencional de produção de café.



As amostras foram coletadas na linha de plantio (LP), em quatro camadas: 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m. A densidade do solo (Ds) e a porosidade do solo (PT) foi determinada pelo método do anel volumétrico com base na massa seca (TEIXEIRA et al., 2017). Os índices de estabilidade de agregados foram determinados de acordo com o método descrito por Kemper e Chepil (1965), onde as amostras de solo foram conduzidas ao peneiramento por meio do vibrador Prooutest. A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada no laboratório a partir das amostras de solo indeformadas usando um penetrômetro eletrônico de bancada (MA 933, MARCONI®), com ponteira de cone sólido de 4 mm com semiângulo de 30° e área do cone de 17,77 mm^2 e velocidade de penetração constante de 10 mm min^{-1} (OTTO et al., 2011).

O teor total de carbono e nitrogênio foi obtido por combustão seca em analisador elementar, após preparo da amostra com peneira de 100 mesh, conforme Nelson e Sommers (1996). Os estoques (Mg ha^{-1}) foram calculados com base na concentração dos elementos, densidade do solo e espessura da camada. Para correção da massa de solo e comparação entre áreas com diferentes manejos, aplicou-se o método de equivalência de massa conforme Ellert e Bettany (1995).

Os dados foram submetidos à estatística descritiva e à análise de variância, com comparação de médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) utilizando o software JASPER. A hipótese testada considerou o efeito dos tratamentos sobre os atributos físicos e químicos do solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A densidade do solo foi menor nas áreas sob SAFs, especialmente em camadas superficiais e na linha de plantio (Tabela 1). E o sistema convencional apresentou os maiores valores para a camada de 0,00-0,10 m (1,37 Mg m^{-3}). Concordando com os resultados obtido por Dori et al. (2022) estudando as características do solo sob sistemas agroflorestais dominantes ao longo da topossequência de Gedeo, sudeste da Etiópia, verificaram que todos os três sistemas agroflorestais apresentaram densidade do solo ideais para o crescimento das raízes. No caso da profundidade do solo, a densidade aumenta com a profundidade, os resultados estão de acordo com os obtidos por Cherubin et al. (2019) em sistemas agroflorestais em região tropical.

Os maiores valores do diâmetro médio ponderado (DMP) foram observados no SAF-M e no SAF-A na linha de plantio da cultura do café na camada de 0,00-0,10 m com valores de 1,95 mm e 1,67 mm, respectivamente, evidenciando maior estabilidade de agregados nesses sistemas (Tabela 1). O sistema convencional apresentou valores inferiores, especialmente em profundidades maiores como na camada de 0,40-0,60 m com o valor de 0,98 mm, indicando menor agregação estrutural. Chen et al. (2017) avaliando os efeitos de sistemas agroflorestais com seringueira na agregação e no teor carbono orgânico do solo, verificaram que as áreas com > 10 anos de práticas agroflorestais melhoraram

significativamente a qualidade do solo em relação a monocultura de seringueira e, particularmente, aumentaram a agregação do solo, o acúmulo de carbono e nitrogênio no solo e melhoraram a distribuição de carbono e nitrogênio dentro dos agregados.

Tabela 1. Atributos físicos do solo em um Nitossolo Vermelho distrófico sob três diferentes manejos, quatro profundidades e dois diferentes locais de coleta na produção cafeeira no município de Careaçu, Minas Gerais, Sudeste do Brasil.

Tratamento	Camada	Ds	PT	MaP	DMP	RSP	CO	EC
	m	Mg m^{-3}	m^3 m^{-3}		mm	MPa	g kg^{-1}	Mg ha^{-1}
SAF-M	0,00-0,10	1,29ab	0,49ab	0,12b	1,64a	2,40a	26,06 a	25,02a
	0,10-0,20	1,29a	0,47b	0,10b	1,78a	2,20a	15,62 a	17,34a
	0,20-0,40	1,30a	0,46a	0,10b	1,31a	1,88a	11,39 a	29,61a
	0,40-0,60	1,25a	0,47a	0,11b	1,09a	1,51a	7,61 b	21,17b
SAF-A	0,00-0,10	1,22b	0,50a	0,21a	1,55a	1,93a	23,04ab	22,12ab
	0,10-0,20	1,22a	0,51a	0,20a	1,62a	2,01a	16,74a	18,58a
	0,20-0,40	1,27a	0,48a	0,18a	1,24a	2,15a	13,03a	33,89a
	0,40-0,60	1,31a	0,46a	0,13b	0,92a	2,37a	9,82a	27,30a
Convencional	0,00-0,10	1,35a	0,46b	0,15ab	1,36a	3,58a	19,38b	18,61b
	0,10-0,20	1,27a	0,48b	0,15a	1,53a	2,87a	15,81a	17,55a
	0,20-0,40	1,23a	0,48a	0,17a	1,30a	2,19a	12,05a	31,32a
	0,40-0,60	1,23a	0,48a	0,18a	1,19a	2,35a	7,86b	21,84b

SAF-M = Sistema Agroflorestal Mantiqueira; SAF-A = Sistema Agroflorestal Aleia; Ds = densidade do solo; PT = porosidade total; MaP = macroporosidade do solo; DMP = diâmetro médio ponderado; RP = resistência do solo à penetração; CO = teor de carbono orgânico total; EC estoque de carbono no solo. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O SAF-A na linha de plantio (0,00-0,10 m) apresentou a maior porosidade total (PT), indicando melhor estrutura física do solo (Tabela 1). Os valores foram geralmente superiores nos SAFs em relação ao sistema convencional, que apresentou porosidade total menor, principalmente em profundidades maiores. Em estudo desenvolvido por Syano et al. (2023) verificaram maior porosidade total em sistema agroflorestal nas terras áridas do leste do Quênia em comparação as áreas de pastagem. Pereira et al. (2025) estudando diferentes sistema de manejo do solo, verificaram que o sistema agroflorestal com o cultivo com café em associação com aleia e pousio com gramíneas melhoram a estrutura da camada superficial do solo, apresentado maior agregação e porosidade do solo em relação ao sistema convencional de cultivo de milho.

A macroporosidade (MaP) foi maior no SAF-A (0,00-0,10 m), com valor de 0,21 m^3 m^{-3} em relação aos demais sistemas estudados, refletindo maior aeração do solo (Tabela 1). Resultados semelhantes foram observados por Pereira et al. (2025) onde verificaram MaP de 0,17 m^3 m^{-3} na camada de 0,00-0,10 m em sistema agroflorestal com café e, os autores afirmam uma melhoria da estrutura pela redução da densidade do solo e aumento da porosidade total. Souza et al. (2017) também observaram em sistemas agroflorestais baseados em café consorciados com pupunha e gliricídia melhoria da estrutura do solo, sendo atribuída à formação de bioporos nesses sistemas.

Os valores de resistência do solo à penetração (RSP) foram maiores no sistema convencional de cultivo de café em comparação com os sistemas agroflorestais (Tabela 1). De acordo com Pereira et al. (2025) os sistemas agroflorestais (AF) que integram espécies perenes (árvores e arbustos com a cultura do café) reduzem a compactação em relação aos sistemas convencionais. Práticas agrícolas convencionais, como aração e gradagem, causam degradação da estrutura do solo devido as perturbações associadas às práticas de manejo do solo (SCHLÜTER et al., 2018). Essas práticas rompem os agregados do solo e a rede de poros, levando ao aumento da densidade do solo, redução da macroporosidade e aumento da resistência solo à penetração (SCHLÜTER et al., 2018; GUO et al., 2020).

Os valores observados para o DMP, RSP e MaP confirmam melhorias na estrutura do solo dentro da camada superficial (0,00-0,10 m) sob os sistemas agroflorestais em relação ao sistema convencional de cultivo de café (Tabela 1). Pereira et al. (2025) avaliaram diferentes sistemas de manejo do solo e, verificaram que o sistema agroflorestal com café e aleia apresentou taxa de infiltração muito alta (515,5 mm h^{-1}) em comparação com o sistema convencional de milho (93,0 mm h^{-1}) e o plantio de eucalipto

(154,9 mm h^{-1}). O SAF também apresentou maior porosidade total (0,51 m^3 m^{-3}), melhor estabilidade de agregados e maior teor carbono orgânico do solo (COS), promovendo melhor funcionamento hidrológico do solo.

Os teores de carbono orgânico total foram maiores nas áreas com sistema agroflorestal em comparação o sistema convencional de cultivo de café (Tabela 1). Grandez-Alberca et al. (2025) estudando sistemas agroflorestais, concluíram que uma cobertura média de sombra de aproximadamente 35% representa um nível agronomicamente ótimo em SAFs com base em café, pois aumenta o carbono orgânico no solo, favorece o desenvolvimento da cultura e facilita a regulação natural dos fatores de saúde do solo e da planta. Segundo Fahad et al. (2022) os SAFs auxiliam na mitigação da erosão do solo e no aumento da fertilidade do solo por meio da adição de matéria orgânica. Da mesma forma, por terem como característica a captura de carbono, superam a capacidade de sequestro de carbono da agricultura convencional, contribuindo para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e fortalecer a resiliência dos ecossistemas.

Verificou-se maiores estoque de carbono no solo nos sistemas agroflorestais na profundidade de 0,00-0,10 m em relação ao sistema convencional de manejo da cultura do café (Tabela 1). As transformações do uso da terra caracterizadas pelo aumento da densidade da vegetação em terras agrícolas permitem maior absorção de CO_2 (CHUAI et al., 2022). Por exemplo, os sistemas agroflorestais de café na Tailândia demonstram um alto valor de estoque de carbono, atingindo 264,12 ± 54,49 Mg C ha^{-1}, em comparação com sistemas não agroflorestais (ASANOK et al., 2024).

De acordo com Anhar et al. (2025) avaliando os estoques de carbono acima do solo em agroflorestas de café e florestas secundárias e primárias na Indonésia, destacam a importância crucial da integração de práticas agroflorestais sustentáveis ao cultivo do café arábica para aumentar o sequestro de carbono e manter as funções ecológicas em paisagens florestais. Os resultados confirmam que sistemas agroflorestais que incorporam uma proporção significativa de árvores maduras de grande diâmetro, particularmente espécies nativas, apresentam maior potencial de armazenamento de carbono.

CONCLUSÕES:

O estudo mostrou que os sistemas de manejo com SAFs apresentaram melhoras na qualidade estrutural do solo principalmente na camada de 0,00-0,10 m em relação ao sistema convencional de cultivo de café. Os resultados indicaram que as práticas de manejo com SAF-M e SAF-A apresentaram maiores teores de carbono orgânico total e estoque de carbono no solo em relação ao sistema convencional na camada de 0,00-0,10 m.

BIBLIOGRAFIA:

ANHAR, A.; HAYATI, D.; MUSLIH, A. M.; SIREGAR, A. W.; JAMILAH, M.; BAIHAQI, A.; MUZAIFA, M.; ABUBAKAR, Y.; HANAN, A. Comparing aboveground carbon stocks in coffee agroforestry and secondary and primary forests in Gayo Highlands, Indonesia. **Frontiers Forest and Global Change**, v.8, p.1-15, 2020.

ASANOK, L.; KRUEAMA, K.; PAKKETANANG, J.; CHIANGRANG, P. Variation of shade tree composition and carbon stock of smallholder coffee agroforestry systems along an elevation gradient in Khun Mae Kuang Forest area, northern Thailand. **Agroforestry Systems**, v.98, n.8, p.3045-3060, 2024.

BORTOLON, E. S. O.; MIELNICZUK, M.; TORNQUIST, C. G.; LOPES; F.; FERNANDES, F. F. Simulação da dinâmica do carbono e nitrogênio em um Argissolo do Rio Grande do Sul usando modelo Century. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.6, p.1635-1646, 2009.

CHEN, C.; LIU, W.; JIANG, X.; WU, J. Effects of rubber-based agroforestry systems on soil aggregation and associated soil organic carbon: Implications for land use. **Geoderma**, v.299, p.13-24, 2017.

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

CHUAI, X.; XIA, M.; XIANG, A.; MIAO, L.; ZHAO, R.; ZUO, T. Vegetation coverage and carbon sequestration changes in China's forest projects area. **Global Ecology and Conservation**, v.38, p.1-14, 2022.

DORI, T.; ASEFAW, Z.; KIPPIE, T. Soil characteristics under dominant agroforestry systems along toposequence of Gedeo, Southeastern Ethiopia. **Environmental and Sustainability Indicators**, v.15, p.1-8, 2022.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v.75, n.4, p.529-538, 1995.

FAHAD, S.; CHAVAN, S. B.; CHICHAGHARE, A. R.; UTHAPPA, A. R.; KUMAR, M.; KAKADE, V.; PRADHAN, A.; JINGER, D.; RAWALE, G.; YADAV, D. K.; KUMAR, V.; FAROOQ, T. H.; ALI, B.; SAWANT, A. V.; SAUD, S.; CHEN, S.; POCZAI, P. Agroforestry systems for soil health improvement and maintenance. **Sustainability**, v.14, n.22, p.1-25, 2022.

GOMES, L. C.; BIANCHI, F. J. J. A.; CARDOSO, I. M.; FERNANDES, R. B. A.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHULTE, R. P. O. Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: A spatially explicit assessment in Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.294, p.1-11, 2020.

GRANDEZ-ALBERCA, M. A.; COTRINA-SANCHEZ, A.; HARO, N.; ZABALETA-SANTISTEBAN, J. A.; SILVA-MELENDEZ, T. B.; SANCHEZ-VEGA, J. A.; MEDINA-MEDINA, A. J.; TUESTA-TRAUCO, K. M.; RIVERA-FERNANDEZ, A. S.; GRANDA-SANTOS, M.; OLIVA-CRUZ, M.; GARCÍA, L.; BARBOZA, E. Agronomic and economic sustainability perspectives in coffee-based agroforestry system (*Coffea arábica* L.) in Rodríguez de Mendoza, Amazonas, Peru. **Trees, Forest and People**, v.21, p.1-11, 2025.

GUO, Y.; FAN, R.; ZHANG, X.; ZHANG, Y.; WU, D.; McLAUGHLIN, N.; LIANG, A. Tillage-induced effects on SOC through changes in aggregate stability and soil pore structure. **Science of the Total Environment**, v.703, p1-9, 2020.

IPCC – PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS **Summary for Policymakers - IPCC WGII Sixth Assessment Report**, 36 p., 2022.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society Agronomy, p.499-510, 1965.

NAIR, P. K. R.; NAIR, V. D.; MOHAN KUMAR, B.; SHOWALTER, J. M. Carbon sequestration in agroforestry systems. In: **Advances in Agronomy**. Chapter 5, p.237-307, 2010.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. **Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Methods of Soil Analysis.** Part 3. Chemical Methods-SSSA Book Series nº 5. Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1996. p.963-1010.

OTTO, R.; SILVA, A. P. P.; FRANCO, H. C. J. C. J. J.; OLIVEIRA, E. C. A. C. A. A.; TRIVELIN, P. C. O. C. O. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development**. Soil and Tillage Research**, v.117, p.201-210, 2011.

PEREIRA, J. R.; SILVA, L. F. S.; FONTANETTI, A.; COOPER, M. Agroforestry management improves soil surface layer structure and hydrological behavior. **Soil and Tillage Research**, v.254, p.1-13, 2025.

SCHLÜTER, S.; GROßMANN, C.; DIEL, J.; WU, G-M.; TISCHER, S.; DEUBEL, A.; RÜCKNAGEL, J. Long-term effects of conventional and reduced tillage on soil structure, soil ecological and soil hydraulic properties. **Geoderma**, v.332, p.10-19, 2018.

SOUZA, G. S. D.; ALVES, D. I.; DAN, M. L.; LIMA, J. S. D. S.; FONSECA, A. L. C. C. D.; ARAÚJO, J.B.S.; GUIMARÃES, L. A. D. O. P. Soil physico-hydraulic properties under organic conilon coffee intercropped with tree and fruit species. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.52, n.7, p.539-547, 2017.

SYANO, N. M.; NYANGITO, M. M.; KIRONCHI, G.; WASONGA, O. V. Agroforestry practices impacts on soil properties in the drylands of Eastern Kenya. **Trees, Forest and People**, v.14, p.1-8, 2023.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3ª edição Revista e Ampliada, Brasília: Embrapa, 2017. 573p.

VANOLLI, B. D. S.; DIAS, H. B.; DALUZ, F. B.; LAMPARELLI, R. A. C.; MAGALHÃES, P. S. G.; CHERUBIN, M. R. Crop-livestock integrated systems improve soil health in tropical sandy soils. **Agronomy**, v.15, n.2, p.1-17, 2025.