

## **DINÂMICA DE C E N DO SOLO EM SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO PÉCUÁRIA-FLORESRTA USANDO ANÁLISE DE ISÓTOPOS ESTÁVEIS**

Lara Gomes Rodrigues<sup>1</sup>, Patrícia Anjos Bittencourt Barreto Garcia<sup>2</sup>, Paulo Henrique Marques Monroe<sup>3</sup>

### **RESUMO**

A dinâmica do carbono no solo em sistemas integrados é complexa e a análise da serrapilheira precede a compreensão dos estoques. Este estudo avaliou a produção e composição da serrapilheira em Sistema Integrado Pecuária-Floresta (SIP), Pastagem (PA) e Floresta Nativa (FN). A análise de variância (ANOVA bifatorial) revelou diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) no aporte total entre sistemas, com a FN (A) superando o SIP (B) e a PA (B). A composição das frações também diferiu qualitativamente: a FN apresentou equilíbrio entre folhas, material miscelâneo e galhos/cascas; o SIP mostrou maior participação de gramíneas, porém com presença de frações lenhosas; e a PA foi dominada exclusivamente por gramíneas, com ausência de material recalcitrante. No SIP, a distância da árvore influenciou significativamente o aporte, com a linha (D1 - A) superando a entrelinha (D2 - B) e o pasto (D3 - B), e apresentando composição qualitativamente similar à FN, com predomínio de folhas e galhos/cascas. Os resultados demonstram que o SIP altera espacialmente a origem do carbono aportado, criando um gradiente. Esta análise fundamenta a aplicação da técnica de isótopos estáveis de  $\delta^{13}\text{C}$ , que se mostra promissora para rastrear a incorporação deste carbono de origem florestal no solo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Carbono do solo, Integração Pecuária-Floresta, Isótopos estáveis, Matéria orgânica do solo, Nitrogênio do solo, Uso da terra

### **SOIL C AND N DYNAMICS IN PECKER-FOREST INTEGRATION SYSTEMS USING STABLE ISOTOPE ANALYSIS**

### **ABSTRACT**

Soil carbon dynamics in integrated systems is complex, and litterfall analysis is a precursor to understanding soil stocks. This study evaluated the quality of carbon input in a Tree-Livestock Integration System (SIP), Pasture (PA), and Native Forest (FN) by assessing litterfall composition and ecological indices. PA exhibited low diversity (Shannon Index,  $H' = 0.44$ ) and absence of recalcitrant material. FN showed high diversity ( $H' = 1.09$ ) and a balance between labile and recalcitrant materials (Ratio = 1.54). In SIP, the position near the trees (D1) showed input quality equivalent to FN ( $H' = 1.11$ ; Ratio = 1.26), while other distances resembled PA. The results demonstrate that SIP qualitatively alters the origin of carbon input, creating a spatial gradient. This analysis grounds the application of the  $\delta^{13}\text{C}$  stable isotope technique, which proves promising for tracking the incorporation of this forest-derived carbon into the soil.

**KEYWORDS:** Land use, Nitrogen in soil, Soil carbon, Soil organic matter, Stable isotopes, Tree–Livestock Integration

## INTRODUÇÃO

A matéria orgânica do solo (MOS) é essencial para a produtividade agrícola, pois participa da ciclagem de nutrientes, melhora a estrutura, reduz a erosão e aumenta a retenção hídrica (MURPHY, 2015). Contudo, em áreas de pastagens, tradicionalmente associadas a maiores estoques de MOS, o manejo inadequado, as mudanças no uso da terra e fatores climáticos têm provocado reduções significativas desse compartimento em escala global (FAGERIA, 2012). Esse declínio evidencia a importância de práticas de manejo voltadas ao sequestro de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (RYALS et al., 2014).

Nesse cenário, os sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF) despontam como alternativa promissora por aliar produção agropecuária e conservação ambiental. Ao combinar árvores, pastagens e gado em um mesmo espaço, o IPF promove maior complexidade ecológica, melhora atributos físicos e químicos do solo, aumenta a MOS e potencializa o sequestro de carbono, aproximando-se das condições de florestas nativas (Nascimento, Garcia & Monroe, 2024; Monroe et al., 2022). Essa transição para um funcionamento similar ao de ecossistemas florestais é inicialmente perceptível pela mudança na qualidade e quantidade do aporte de resíduos orgânicos, principalmente via serrapilheira. A presença de árvores eleva o aporte de resíduos orgânicos pela serrapilheira e biomassa radicular, além de influenciar o microclima e a ciclagem de nutrientes (Monroe & Garcia, 2021; Ayala-Montejo et al., 2022). Como resultado, espera-se maior acúmulo de carbono total (CT) e nitrogênio total (NT) nesses ambientes em comparação a pastagens convencionais, e valores próximos aos observados em florestas nativas (Monroe et al., 2022).

Para desvendar os mecanismos por trás do sequestro de carbono, é fundamental investigar a origem e a dinâmica da MOS. A análise da composição da serrapilheira fornece um indicativo direto da qualidade do material que está entrando no sistema. Para rastrear como esse carbono se incorpora e persiste no solo, a análise de isótopos estáveis se consolida como a ferramenta mais robusta. O  $\delta^{13}\text{C}$  permite discriminar a contribuição relativa de espécies de plantas com diferentes vias fotossintéticas (C3, típicas de florestas, e C4, típicas de pastagens tropicais) para a MOS, funcionando como um marcador natural da origem do carbono (Gerschlaier et al., 2019; Balesdent et al., 2018). Paralelamente, o  $\delta^{15}\text{N}$  reflete transformações e perdas de nitrogênio no solo, indicando a intensidade da ciclagem de nutrientes (Janovský et al., 2024). Assim, o uso combinado da caracterização da serrapilheira e das assinaturas isotópicas no solo permite uma compreensão mecanicista e preditiva da dinâmica da matéria orgânica.

Com base nisso, este estudo analisou IPF, pastagem (PA) e floresta nativa (FN) como referência, integrando a caracterização da serrapilheira com a análise de isótopos estáveis de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{15}\text{N}$  no solo para buscar responder: (i) como a qualidade do aporte de carbono pela serrapilheira difere entre os sistemas? (ii) como variam os estoques de CT, NT e as assinaturas isotópicas de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{15}\text{N}$  no solo? (iii) como ocorre a variação vertical e espacial desses parâmetros no IPF? As hipóteses propostas são: (1) a serrapilheira no IPF apresenta composição qualitativamente intermediária, com dominância de material C3 próximo às árvores; (2) em consequência, o IPF apresenta valores de CT, NT e assinaturas isotópicas de  $\delta^{13}\text{C}$  no solo intermediários aos da FN e da PA, indicando a incorporação de carbono de origem florestal; (3) no IPF, esses estoques e a assinatura de  $\delta^{13}\text{C}$  são mais similares à FN nas camadas superficiais e nas áreas próximas às árvores.

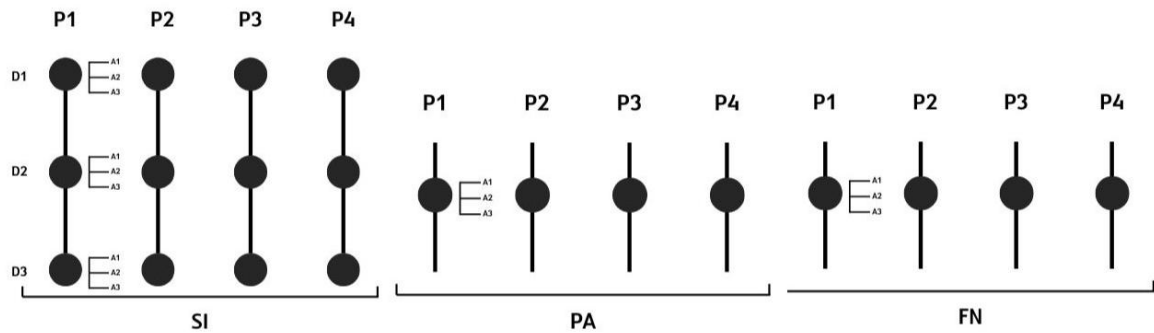
#### MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido no município de Barra do Choça, estado da Bahia ( $14^{\circ}52'51''\text{S}$ ,  $40^{\circ}34'44''\text{O}$ ), Nordeste do Brasil. A área de estudo localiza-se no Bioma Mata Atlântica, de acordo com a delimitação do IBGE (2019). O clima regional é classificado como tropical de altitude (Cwb), com temperatura média anual de  $21^{\circ}\text{C}$  e precipitação entre 900 e 1200 mm. A área é caracterizada por Latossolos Amarelos e Vermelho-Amarelos.

Foram avaliados três sistemas de uso da terra: i) Sistema Integrado Pecuária-Floresta (IPF), composto por um consórcio de árvores do gênero *Eucalipto* (15 anos) e pastagem; ii) Pastagem (PA), manejada de forma convencional; e iii) Floresta Nativa (FN), um fragmento florestal conservado utilizado como referência. Em cada sistema, foram estabelecidas quatro parcelas de amostragem (repetições), totalizando 12 unidades experimentais. No SIP, a coleta foi estratificada em três distâncias em relação às árvores (Figura 1): D1 (linha da árvore), D2 (entrelinha) e D3 (pasto).

**FIGURA 1:** Delineamento amostral com parcelas (P1-P4), profundidades (A1-A3) e distâncias no Sistema Integrado (D1: linha; D2: entrelinha; D3: pasto). PA e FN

seguiram esquema similar, sem estratificação por distância.



Fonte: Autoria própria, 2025.

A coleta da serrapilheira foi realizada de forma aleatória em cada parcela, utilizando um quadrado de amostragem de 0,04 m<sup>2</sup> (20x20 cm). No IPF, a coleta foi estratificada em três distâncias em relação às árvores: D1 (na linha da árvore), D2 (na entrelinha) e D3 (área de pasto, mais distante). Todo o material vegetal depositado foi coletado, seco em estufa a 65°C até massa constante e, posteriormente, fracionado manualmente nos componentes: folhas, galhos/cascas, material reprodutivo, gramíneas e material micelâneo. Cada fração foi pesada para determinação da biomassa.

As amostras de solo foram coletadas nas mesmas parcelas e distâncias da serrapilheira, empregando-se um trado holandês para amostragem deformada nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. O delineamento totalizou 60 amostras: PA (4 parcelas x 3 profundidades = 12), FN (4x3=12) e SIP (4 parcelas x 3 distâncias x 3 profundidades = 36). O preparo das amostras consistiu em secagem ao ar, destorroamento manual em graal de porcelana, homogeneização e peneiramento em malha de 2 mm, obtendo-se a Terra Fina Seca ao Ar (TFSA).

As análises laboratoriais da TFSA serão realizadas em parceria com a Embrapa Solos (Rio de Janeiro-RJ). Está prevista a determinação do Carbono Total (CT) e Nitrogênio Total (NT) por combustão seca em analisador elementar, bem como a análise dos isótopos estáveis de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{15}\text{N}$  por espectrometria de massa de razão isotópica.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância ( $p < 0,05$ ) mostrou diferenças na produção de serrapilheira entre sistemas (Figura 1-A). A FN (A) apresentou aporte total superior ao SIPF (B) e PA (B), que não diferiram entre si.

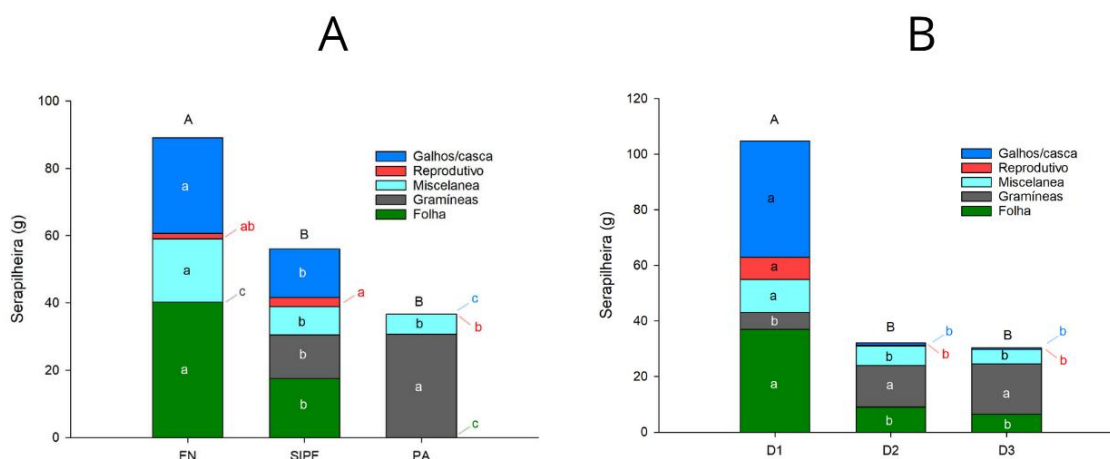
A composição das frações diferenciou os sistemas. Na FN, folhas, miscelânea e galhos/cascas (a) foram majoritários. A PA foi dominada por gramíneas (a). O SIPF

apresentou condição intermediária, com folhas, gramíneas, miscelânea e galhos/cascas (b) equivalentes.

No SIPF (Figura 1-B), a linha (D1 - A) teve aporte superior à entrelinha (D2 - B) e pasto (D3 - B). D1 mostrou predomínio de folhas, miscelânea e galhos/cascas (a), enquanto D2 e D3 foram dominados por gramíneas (a).

Este gradiente justifica a aplicação de  $\delta^{13}\text{C}$ , esperando-se assinatura similar à FN (C3) em D1 e à PA (C4) em D2/D3.

**FIGURA 1:** Produção e composição da serrapilheira.



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

**A.** Sistemas: FN, SIPF, PA. **B.** Distâncias no SIPF: D1, D2, D3.

Letras maiúsculas: aporte total (Tukey,  $p < 0,05$ ). Minúsculas: frações dentro de cada sistema/distância.

#### CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES

Os resultados demonstram que o Sistema Integrado Pecuária-Floresta (SIP) altera a origem e a composição do material vegetal que compõe o aporte de serrapilheira. A análise de variância confirmou que, nas proximidades das árvores (D1), a serrapilheira apresenta quantidade total e composição física equivalentes às da Floresta Nativa e significativamente superiores às da Pastagem. Essa mudança no padrão de aporte, detectada pelas diferenças estatísticas entre frações, é um indicativo forte de que a dinâmica de formação do carbono no solo será diferente. Portanto, os dados validam a abordagem metodológica baseada em isótopos estáveis de  $\delta^{13}\text{C}$ , criando a expectativa de que a assinatura isotópica do solo no SIP refletirá o gradiente de materiais observado. Conclui-se que a análise estatística da serrapilheira foi uma ferramenta eficaz para justificar e direcionar a investigação isotópica subsequente, que será fundamental para confirmar a incorporação efetiva do carbono de origem florestal no solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AYALA-MONTEJO, D.; MONTOYA, J. R.; MENDOZA, M. A. et al. Soil Biological Activity, Carbon and Nitrogen Dynamics in Coffee Agroforestry Systems. *Agronomy*, Basel, v. 12, n. 8, p. 1794, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081794>
2. BALESSENT, J. et al. Atmosphere–soil carbon transfer as a function of soil depth. *Nature*, London, v. 559, p. 599–602, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0328-3>
3. CARDOSO, C. A.; NÓBREGA, J. C. A. Classificação e Aptidão Agrícola dos Solos da Microrregião de Vitória da Conquista, BA. 2. ed. Vitória da Conquista: UESB, 2023.
4. FAGERIA, N. K. Role of Soil Organic Matter in Maintaining Sustainability of Cropping Systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Philadelphia, v. 43, n. 16, p. 2063–2113, 2012. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.697234>
5. GARCIA, P. A. B. B. et al. Aplicação do  $\delta^{13}\text{C}$  e do  $\delta^{15}\text{N}$  em estudos sobre dinâmica da matéria orgânica em solos superficiais do Brasil: uma síntese e perspectivas. *ResearchGate*, 2025. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/390479225>. Acesso em: 29 set. 2025.
6. GERSCHLAUER, F. et al. Stable carbon and nitrogen isotopic composition of leaves, litter, and topsoils: Case study on ecosystem differentiation in an African savanna. *Biogeosciences*, Göttingen, v. 16, p. 409–427, 2019. <https://doi.org/10.5194/bg-16-409-2019>
7. IBGE. *Biomass e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil: Compatível com a Escala 1:250 000*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.
8. JANOVSKEÝ, M. et al. Stable isotope analysis in soil prospection reveals the type of past land use and soil organic matter dynamics. *Scientific Reports*, London, v. 14, n. 1, p. 1-12, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63563-1>

9. MONROE, P. H. M.; GARCIA, P. A. B. B. Fine root contribution to the soil carbon stock of an agroforestry system in a Caatinga-Atlantic Forest transition zone. *Agroforestry Systems*, Dordrecht, v. 95, p. 1065–1077, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00671-7>
10. MONROE, P. H. M. et al. Carbon and Nitrogen Occluded in Soil Aggregates Under Cacao-Based Agroforestry Systems in Southern Bahia, Brazil. *Tropical Ecology*, New Delhi, v. 63, p. 195–205, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42965-021-00183-5>
11. MURPHY, B. W. Impact of soil organic matter on soil properties – a review with emphasis on Australian soils. *Soil Research*, Clayton, v. 53, n. 6, p. 605–635, 2015. <https://doi.org/10.1071/SR14246>
12. NASCIMENTO, M. S.; GARCIA, P. A. B. B.; MONROE, P. H. M. Carbon in soil macroaggregates under coffee agroforestry systems: Modeling the effect of edaphic fauna and residue input. *Applied Soil Ecology*, Amsterdam, v. 195, p. 104708, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.104708>
13. RYALS, R. et al. Impacts of organic matter amendments on carbon and nitrogen dynamics in grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, Amsterdam, v. 68, p. 52–61, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.09.011>