



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FITOTECNIA**

**SISTEMAS AGROFLORESTAIS DE CAFÉ E SUA INFLUÊNCIA NA
MACROFAUNA EDÁFICA E NOS ESTOQUES E VALORAÇÃO
ECONÔMICA DO CARBONO DO SOLO**

MONALISA FAGUNDES OLIVEIRA

**VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA - BRASIL
2024**

MONALISA FAGUNDES OLIVEIRA

**SISTEMAS AGROFLORESTAIS DE CAFÉ E SUA INFLUÊNCIA NA
MACROFAUNA EDÁFICA E NOS ESTOQUES E VALORAÇÃO
ECONÔMICA DO CARBONO DO SOLO**

Tese apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Fitotecnia, para a obtenção do título de “Doutora”.

Orientador(a): Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia
Coorientador: Paulo Henrique Marques Monroe

VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA - BRASIL
2024

O48s

Oliveira, Monalisa Fagundes.

Sistemas agroflorestais de café e sua influência na macrofauna edáfica nos estoques e valoração econômica do carbono do solo. / Monalisa Fagundes Oliveira, 2024.

93f. : il.

Orientador (a): D.Sc. Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de concentração em Fitotecnia. Vitória da Conquista, 2024.

Inclui referência F. 86 - 90.

- I. Fauna edáfica. 2. Carbono. 3. *Coffea*. 4. Solo. I. Barreto-Garcia, Patrícia Anjos Bittencourt. II. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. T.

CDD. 591.9813

Catálogo na fonte: Juliana Teixeira de Assunção – CRB 5/1890

UESB - Campus Vitória da Conquista – Ba.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
Área de Concentração em Fitotecnia**

Campus de Vitória da Conquista, BA

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “SISTEMAS AGROFLORESTAIS DE CAFÉ E SUA INFLUÊNCIA NA MACROFAUNA EDÁFICA E NOS ESTOQUES E VALORAÇÃO ECONÔMICO DO CARBONO DO SOLO”.

AUTOR (A): Monalisa Fagundes Oliveira

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTORA EM AGRONOMIA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM FITOTECNIA, pela seguinte Banca Examinadora:



Patrícia A. Bittencourt Barreto-Garcia, D.Sc. (UESB)

Marcio Nunes

Márcio Renato Nunes, Ph.D. (University of Florida)

Emanuela Forestieri Gama-Rodrigues

Emanuela Forestieri Gama-Rodrigues, Ph.D. (UENF)



João Carlos Medeiros, D.Sc. (UFSB)



Documento assinado digitalmente

LINIKER FERNANDES DA SILVA

Data: 27/02/2024 11:41:54-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Liniker Fernandes da Silva, D.Sc. (UFRB)

Data de realização: 23 de Fevereiro de 2024.

AGRADECIMENTOS

A Deus, agradeço pela fé e força que me concedeu para a realização desse sonho. Suas bênçãos foram fundamentais ao longo dessa jornada.

Ao meu pai, *in memoriam*, que está presente em meu coração.

À minha orientadora, Dra. Patrícia, minha inspiração acadêmica, agradeço profundamente. Sua paciência, sinceridade, ensinamentos e crença em meu potencial foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Seu apoio constante e orientação foram essenciais para que eu pudesse superar desafios e concluir esta etapa.

Ao meu coorientador, Dr. Paulo, expresso minha sincera gratidão por suas idas ao campo, paciência e sabedoria inestimáveis para o progresso deste trabalho. Sua orientação e conhecimento contribuíram significativamente para o avanço desta pesquisa.

Aos proprietários da Fazenda Produtiva Ibicoara, agradeço pela disponibilidade de tempo e pela gentileza em colaborar sempre que solicitado. A ajuda de vocês foi imprescindível para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu supervisor do doutorado sanduíche, Dr. Márcio, agradeço pelos preciosos conhecimentos e por me receber na Universidade da Flórida. Sua orientação e apoio foram fundamentais para enriquecer minha pesquisa e expandir meus horizontes acadêmicos.

Aos meus familiares, especialmente à minha tia Mariza, por sempre acreditarem no meu sonho de ser doutora.

Aos meus sogros, Denise e Marcos, obrigado por todo o cuidado e amor ao longo de toda essa jornada.

Ao meu marido, Marcos Junior, agradeço por toda a força, incentivo e amor que ele me proporciona. Você é minha inspiração constante em procurar sempre o melhor. Obrigada por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis e por ser meu maior incentivo em todas as áreas da minha vida, incluindo minha jornada acadêmica.

Aos meus colegas do laboratório Forest Soils, por sua valiosa colaboração em análises, trabalhos de campo e parceria ao longo desta jornada. Em especial, quero agradecer a Eryca, Mariana, Talita, Lucas, Natiane e Daniela. Suas contribuições foram essenciais e fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Ao Prof. Divino, agradeço por disponibilizar o Laboratório de Microbiologia dos Solos (UESB) para este trabalho.

Ao Laboratório de Solos (LSOL-UENF), em especial à Professora Dra. Emanuela, agradeço pela parceria nas análises realizadas.

Ao professor Dr. Liniker, agradeço pelos ensinamentos e colaboração ao longo deste trabalho.

Ao professor Dr. João Medeiros, agradeço pela disponibilidade do equipamento de laboratório.

A todos os meus amigos que estiveram presentes e me incentivaram ao longo deste percurso, em especial a Fabrícia, Mateus, Carol e Kaíque.

À minha psicóloga, Carol França, agradeço pelo apoio psicológico e por acreditar no meu potencial.

À Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela infraestrutura e fornecimento de materiais para a realização desta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), agradeço pela concessão da bolsa de doutorado sanduíche.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), agradeço pela bolsa de doutorado.

RESUMO GERAL

OLIVEIRA, M.F. **Sistemas agroflorestais de café e sua influência na macrofauna edáfica e nos estoques e valoração econômica do carbono do solo.** Vitória da Conquista-BA, UESB, 2024. 93 p. (Tese: Doutorado em Agronomia; Área de Concentração: Fitotecnia)*.

Os sistemas agroflorestais (SAFs) de café promovem o aumento ou manutenção da quantidade e qualidade dos resíduos vegetais depositados no solo, propiciando o acúmulo de matéria orgânica. Esse processo influencia positivamente a fauna edáfica, a formação de agregados e o armazenamento de carbono no solo, resultando na prestação de serviços ambientais, como o incremento da biodiversidade regional, além de proporcionar benefícios socioeconômicos para os agricultores, destacando-se também pelo seu potencial de sequestro de carbono. Portanto, formulamos as seguintes hipóteses: (1) os sistemas de cultivo de café, especialmente os sistemas agroflorestais biodiversificados, têm um impacto positivo no acúmulo de carbono no solo, na diversidade da macrofauna edáfica e na formação de agregados do solo; e (2) a diversificação dos sistemas de cultivo de café resulta em vantagens econômicas e ambientais superiores, evidenciadas por uma valoração econômica ampliada dos serviços ecossistêmicos oferecidos, incluindo o sequestro de carbono, em comparação com os sistemas de monocultivo convencionais. Neste contexto, o principal objetivo deste estudo é quantificar o impacto dos diferentes sistemas de cultivo de café no armazenamento de carbono no solo, na biodiversidade da macrofauna edáfica, na distribuição dos agregados do solo e na valoração econômica desses sistemas em termos de serviços ecossistêmicos e sequestro de carbono. O trabalho foi dividido em duas etapas, resultando dois artigos. O primeiro foi desenvolvido no município de Ibicoara, Bahia, Brasil, onde foram avaliados três SAFs biodiversos (SAF-MB: café consorciado com mogno e banana; SAF-SPM: café com sibipiruna, paricá e mogno; e SAF-BMG: café com cedro, banana, mangueira, castanha-do-pará, grevilea, fruta-pão, cinamomo e mogno) e um consórcio de café com *Brachiaria* spp. Foram coletadas amostras de solo (profundidade 0-10cm). O fracionamento em classes de agregados foi realizado no campo, resultando em quatro classes de tamanho: maiores que 6 mm, entre 6 e 4 mm, entre 4 e 2 mm e menores que 2 mm. Os agregados maiores que 6 mm foram classificados morfológicamente. A amostragem da macrofauna do solo foi realizada pelo método *Tropical Soil Biology and Fertility* (TSBF). O segundo artigo foi conduzido em dois municípios da Bahia (Planalto e Ibicoara), Brasil, onde foram avaliados sete sistemas de cultivo de café, incluindo sistemas agroflorestais biodiversos e monocultivo convencional. Os estoques de carbono do solo (0-100 cm) foram estimados a partir da densidade e teores de carbono do solo (determinados por combustão seca em analisador elementar). Os valores de estoque de carbono foram utilizados para projetar cenários de mudança de uso do solo por meio de comparações entre os sistemas estudados. Estimou-se a valoração econômica dos cenários e o estoque total de carbono do solo em cada sistema de cultivo de café, incluindo seus ganhos. No artigo um, os sistemas de café contribuíram para o aumento ou manutenção dos estoques totais de carbono do solo em relação à floresta nativa (FN) (0-10 cm), enquanto o estoque de CL (carbono lábil do solo) não apresentou diferenças entre os sistemas. No SAF-MB, não houve distinção significativa no estoque total de serapilheira e em outros componentes da serapilheira em comparação com a FN. Observou-se que a classe > 6 mm representou mais de 40% dos agregados na maioria dos sistemas investigados, enquanto as classes 6-

***Orientador:** Profa. Dra. Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia, UESB e **Coorientador:** Dr. Paulo Henrique Monroe, UESB.

4 mm e 4-2 mm tiveram uma proporção menor. Por outro lado, a classe <2 mm apresentou uma participação intermediária. Os agregados biogênicos foram a classe morfológica predominante, evidenciando diferenças entre os sistemas analisados. Na macrofauna, foram identificados 27 grupos taxonômicos nos cinco sistemas avaliados. No artigo dois, os sistemas de cultivo de café em Ibiçara e os sistemas agroflorestais de café em Planalto demonstraram manter os estoques totais de carbono no solo em comparação com a floresta nativa em uma profundidade de 0 a 100 cm. Evidenciou-se um incremento no acúmulo de carbono em equivalente de CO_{2e} nos cenários que propiciaram ganhos. Todos os sistemas de café nos dois municípios registraram uma receita que excedeu os custos associados. Na análise dos sistemas de cultivo de café em Ibiçara, a relação benefício/custo (B/C) foi superior a 1 para todos os sistemas, indicando viabilidade econômica. Em Planalto, essa relação foi superior a 1 para os SAFs, porém, inferior a 1 para o monocultivo de café, destacando a eficácia econômica dos SAFs em relação ao modelo convencional. Os resultados deste estudo corroboram a hipótese de que os sistemas de cultivo de café, particularmente os sistemas agroflorestais biodiversos, exercem um efeito positivo no acúmulo de carbono no solo, na diversidade da macrofauna edáfica e na formação de agregados do solo. No que diz respeito à valoração econômica, a hipótese foi confirmada, já que os sistemas de café estudados demonstraram ser economicamente viáveis, com uma receita que superou os custos. Portanto, esses resultados destacam a importância dos SAFs como uma estratégia sustentável e rentável para a produção de café, tanto em termos ambientais quanto em econômicos.

Palavras-chave: fauna edáfica; carbono; *Coffea*; solo.

GENERAL ABSTRACT

OLIVEIRA, M.F. **Coffee agroforestry systems and their influence on macrofauna and stocks and economic valuation of soil carbon.** Vitoria da Conquista-BA, UESB, 2024. 93 p. (Thesis: Doctorate in Agronomy; Area of Concentration: Crop Science)*.

Coffee agroforestry systems (AFS) promote the increase or maintenance of the quantity and quality of vegetal residues deposited in the soil, facilitating organic matter accumulation. This process positively influences soil fauna, aggregate formation, and carbon storage in the soil, resulting in the provision of environmental services such as regional biodiversity enhancement, as well as providing socio-economic benefits for farmers, also standing out for its potential of carbon sequestration. Therefore, we formulated the following hypotheses: (1) coffee cultivation systems, especially diversified agroforestry systems, have a positive impact on soil carbon accumulation, soil macrofauna diversity, and soil aggregate formation; and (2) the diversification of coffee cultivation systems results in superior economic and environmental advantages, evidenced by an expanded economic valuation of the ecosystem services offered, including carbon sequestration, compared to conventional monoculture systems. In this context, the main objective of this study is to quantify the impact of different coffee cultivation systems on soil carbon storage, soil macrofauna biodiversity, soil aggregate distribution, and economic valuation of these systems in terms of ecosystem services and carbon sequestration. The work was divided into two stages, resulting in two papers. The first was conducted in Ibicoara, Bahia, Brazil, where three biodiverse agroforestry systems (AFS-MB: coffee intercropped with mahogany and banana; AFS-SPM: coffee with sibipiruna, parica, and mahogany; and AFS-BMG: coffee with cedar, banana, mango, Brazil nut, silk oak, breadfruit, chinaberry, and mahogany) and a coffee consortium with *Brachiaria* spp. were evaluated. Soil samples were collected (depth 0-10 cm). Aggregate fractionation into size classes was performed in the field, resulting in four size classes: larger than 6 mm, between 6 and 4 mm, between 4 and 2 mm, and smaller than 2 mm. Aggregates larger than 6 mm were morphologically classified. Soil macrofauna sampling was conducted using the Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF) method. The second stage was conducted in two municipalities in Bahia (Planalto and Ibicoara), Brazil, where seven coffee cultivation systems were evaluated, including diversified agroforestry systems and conventional monoculture. Soil carbon stocks (0-100 cm) were estimated from soil density and carbon content (determined by dry combustion in an elemental analyzer). Carbon stock values were used to project land use change scenarios through comparisons between the studied systems. Economic valuation of the scenarios and total soil carbon stock in each coffee cultivation system, including their gains, were estimated. In the first paper, coffee systems contributed to the increase or maintenance of total soil carbon stocks compared to native forest (0-10 cm), while labile carbon (LC) stock showed no differences between the systems. In SAF-MB, there was no significant distinction in total litter stock and in other litter components compared to native forest. It was observed that the >6 mm class represented more than 40% of aggregates in most investigated systems, while the 6-4 mm and 4-2 mm classes had a smaller proportion. On the other hand, the <2 mm class exhibited intermediate participation. Biogenic aggregates were the predominant morphological class, showing differences between the analyzed systems. In macrofauna, 27 taxonomic groups were identified in the five evaluated systems. In the second paper, coffee cultivation systems

***Advisor:** Profa. Dra. Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia, UESB. **Co-Advisor:** Dr. Paulo Henrique Marques Monroe, UESB.

in Ibicoara and agroforestry coffee systems in Planalto demonstrated to maintain total soil carbon stocks compared to native forest at a depth of 0 to 100 cm. An increase in carbon accumulation in CO₂ equivalent (carbon dioxide) was evidenced in scenarios that provided gains. All coffee systems in the two municipalities recorded revenue exceeding associated costs. In the analysis of coffee cultivation systems in Ibicoara, the benefit-cost ratio (B/C) was greater than 1 for all systems, indicating economic viability. In Planalto, this ratio was greater than 1 for AFS and less than 1 for coffee monoculture, highlighting the economic effectiveness of AFS compared to the conventional model. The results of this study corroborate the hypothesis that coffee cultivation systems, particularly diversified agroforestry systems, have a positive effect on soil carbon accumulation, soil macrofauna diversity, and soil aggregate formation. Regarding economic valuation, the hypothesis was confirmed, as the studied coffee systems proved to be economically viable, with revenue surpassing costs. Therefore, these results highlight the importance of AFS as a sustainable and profitable strategy for coffee production, both environmentally and economically.

Keywords: Edaphic fauna; carbon; *Coffea*; soil.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO I: A diversificação de sistemas agroflorestais de café influencia a interação entre carbono, agregados e fauna da camada superficial do solo

- Figura 1 – Localização da área experimental no município de Ibicoara-BA, Brasil.....30
- Figura 2 – Esquema do arranjo espacial de quatro sistemas de cultivo de café e floresta nativa do município de Ibicoara, Bahia, Brasil.....33
- Figura 3 – Visão externa dos sistemas de cultivo de café e vegetação nativa: (a) consórcio de café com gramínea forrageira, (b) sistema agroflorestal de café com banana e mogno, (c) sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno, (d) e (e) sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevilea, fruta-pão, cinamomo e mogno e (f) floresta nativa.....35
- Figura 4 – Estoques de carbono lábil (CL) e carbono total do solo (CL+CNL) e atributos da serapilheira (teores de compostos orgânicos e estoques das frações folhas e outros) em quatro sistemas de cultivo de café e em floresta nativa. Em que: CF – consórcio de café com forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM – sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevilea, fruta-pão, cinamomo e mogno; FN – floresta nativa; POL – polifenóis; LIG – lignina; CEL – celulose (g kg^{-1}). Letras iguais acima e abaixo das barras comparam os sistemas e não diferem entre si pelo teste Fisher LSD a 5% de significância. Letras abaixo das barras (na parte inferior do gráfico) correspondem aos estoques de carbono total do solo.....38
- Figura 5 – Proporção das classes morfológicas (%) em quatro sistemas de cultivo de café e em floresta nativa: (a) Comparação entre classes morfológicas e (b) comparação entre sistemas. Em que: CF - consórcio de café com forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM - sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevilea, fruta-pão, cinamomo e mogno; e FN – floresta nativa; Letras iguais nas barras de mesma cor não diferem entre si pelo teste de Fisher a 5% de significância.....42
- Figura 6 – Grupos predominantes da macrofauna edáfica em quatro sistemas de cultivo de café e em floresta nativa. Em que: CF – consórcio de café com forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM – sistema agroflorestal de

café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevílea, fruta-pão, cinamomo e mogno; FN – floresta nativa; H' – Índice de Shannon; J – índice de equitabilidade de Pielou. Letras maiúsculas iguais acima e minúsculas dentro das barras não diferem entre si pelo teste Kruskal Wallis a 5% de significância.....	43
Figura 7 – Diagrama de ordenação produzido pela análise de componentes principais (a) e matriz de correlação de Pearson (b) de atributos do solo (fauna, carbono, agregação), raízes e serapilheira em quatro sistemas de cultivo de café e em floresta nativa. Em que: CF – consórcio de café com forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM – sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevílea, fruta-pão, cinamomo e mogno; FN – floresta nativa; CT – carbono total do solo; CL – carbono lábil do solo; Isop, Isopt e Olig – grupos Isopoda, Isoptera e Oligochaeta; Riq – riqueza; Dens – densidade do solo; Bio – agregados biogênicos; Ag < 6, Ag 6-4, Ag 4-2 e Ag < 2 – proporção das classes de agregados > 6, 6-4, 4-2 e < 2 mm, respectivamente; Serap – serapilheira; Lig – lignina da serapilheira; CT > 6, CT 6-4, CT 4-2 e CT < 2 – carbono total das classes de agregados; CL > 6; CL 6-4, CL 4-2 e CL < 2 – carbono lábil dos agregados; Raiz 6, Raiz 6-4 e Raiz 4-2 mm – raízes das classes dos agregados.....	44

ARTIGO II: Carbono orgânico do solo como serviço ecossistêmico de sistemas agroflorestais de café: quantificação, valoração e análise econômica

Figura 1 – Localização do município de Ibicoara e Lucaia, Bahia, Brasil.....	69
Figura 2 – Estoque de carbono total no solo (Mg ha ⁻¹) de 0-100 cm em sistemas de cultivo de café e floresta nativa. A) Município de Ibicoara; e B) Município de Planalto. Em que: CF - consórcio de café com forrageira; CM - monocultivo de café; SAF-MB - sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM – sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevílea, fruta-pão, cinamomo e mogno; SAF-B – Carbono do café com banana; SAF-G – Carbono do café com Grevílea; e FNi – floresta nativa Ibicoara, FNp – floresta nativa Planalto. Letras iguais acima das barras não diferem entre si pelo teste Fisher LSD, a 1% de significância.....	76

Figura 3 – Perdas e ganhos no estoque de carbono total do solo (Mg ha^{-1}) de 0-100 cm em sistemas de cultivo de café e floresta nativa: A) Perdas de carbono no solo em Ibicoara; B) Perdas de carbono no solo em Planalto; C) Ganho de carbono no solo em Ibicoara; D) Ganho de carbono no solo em Planalto; e E) Perdas e ganhos de carbono no solo em Ibicoara em relação ao CF. Em que: CF – consórcio de café com forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM – sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevílea, fruta-pão, cinamomo e mogno; FNi – floresta nativa Ibicoara; CM – monocultivo de café; SAF-B – Carbono do café com banana; SAF-G – Carbono do café com Grevílea; e FNp – floresta nativa Planalto.78

LISTA DE TABELAS

ARTIGO I: A diversificação de sistemas agroflorestais de café influencia a interação entre carbono, agregados e fauna da camada superficial do solo

Tabela 1 - Caracterização química e física do solo (profundidade 0-10 cm) em quatro sistemas de cultivo de café e em floresta nativa.....	31
Tabela 2 - Proporção de agregados (%), massa de raiz, teores de carbono lábil (CL) e carbono total (CT) e nitrogênio total (NT) dos agregados em quatro sistemas de cultivo de café e em floresta nativa.	40
Tabela 3 - Cargas fatoriais das variáveis na análise de componentes principais (ACP) de atributos do solo (fauna, carbono e agregados) e serapilheira em sistemas de cultivo de café e em floresta nativa.....	45

ARTIGO II: Carbono orgânico do solo como serviço ecossistêmico de sistemas agroflorestais de café: quantificação, valoração e análise econômica

Tabela 1 - Caracterização de seis sistemas de cultivo de café (um consórcio com forrageira, um monocultivo e cinco sistemas agroflorestais) dos municípios de Ibicoara e Planalto, Bahia, Brasil.....	70
Tabela 2 - Cenários de mudança no uso da terra com sistemas de cultivo de café em dois municípios do estado da Bahia (Planalto e Ibicoara).....	72
Tabela 3 - Cenários, CO ₂ equivalente e valor monetário de mudança no uso da terra com sistemas de cultivo de café em dois municípios do estado da Bahia (Planalto e Ibicoara).....	78
Tabela 4 - Receitas totais (R\$) dos sistemas em sete sistemas de cultivo de café do município de Ibicoara e Planalto, Bahia.....	79
Tabela 5 - Custos totais (R\$) dos sistemas em sete sistemas de cultivo de café do município de Ibicoara e Planalto, Bahia.....	80
Tabela 6 - Análise econômica dos sistemas em sete sistemas de cultivo de café do município de Ibicoara e Planalto, Bahia.....	81

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	17
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21
3. ARTIGO I.....	25
RESUMO	26
ABSTRACT	27
3.1 INTRODUÇÃO.....	28
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.2.1 Área de estudo	30
3.2.2 Desenho experimental	31
3.2.3 Amostragem de serapilheira e solo.....	33
3.2.4 Composição orgânica da serapilheira	35
3.2.5 Fracionamento físico em classe de agregados.....	35
3.2.6 Avaliação morfológica	36
3.2.7 Raízes finas.....	36
3.2.8 Carbono total e carbono lábil do solo.....	36
3.2.9 Macrofauna edáfica	37
3.2.10 Análise estatística	37
3.3 RESULTADOS	38
3.3.1 Serapilheira, polifenóis, lignina, celulose, carbono total e lábil do solo	38
3.3.2 Agregados, raízes e carbono	39
3.3.3 Origem dos agregados e macrofauna edáfica	41
3.3.4 Interação fauna, agregados e carbono.....	43
3.4 DISCUSSÃO	46
3.4.1 Estoques de serapilheira, polifenóis, lignina, celulose, carbono total e lábil do solo	46

3.4.2 Agregados, raízes e carbono	47
3.4.3 Origem dos agregados e macrofauna edáfica	49
3.4.4 Interação fauna, agregados e carbono	51
3.5 CONCLUSÕES	53
3.6 REFERÊNCIAS	53
4. ARTIGO II	62
RESUMO	63
ABSTRACT	65
4.1 INTRODUÇÃO	66
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	67
4.2.1 Descrição das áreas	67
4.2.2 Sistema de uso da terra	68
4.2.3 Amostragem do solo	70
4.2.4 Estoque de carbono no solo	71
4.2.5 Cenários de mudanças no uso da terra	71
4.2.6 Valoração do carbono do solo	72
4.2.7 Análise Econômica	73
4.2.8 Análise estatística	74
4.3. RESULTADOS	75
4.3.1 Estoque de carbono do solo	75
4.3.2 Variações de carbono do solo em diferentes cenários	76
4.3.3 Valoração do estoque de carbono	78
4.3.4 Análise Econômica	79
4.4 DISCUSSÃO	82
4.4.1 Estoque de carbono do solo	82
4.4.2 Variações de carbono do solo em diferentes cenários	83
4.4.3 Valoração do estoque de carbono	83

4.4.4 Análise Econômica	84
4.5 CONCLUSÕES	86
4.6 REFERÊNCIAS	86
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
4. ANEXOS	92

1. INTRODUÇÃO GERAL

O café é uma das bebidas mais consumidas globalmente e desempenha um papel crucial na economia, especialmente nas regiões tropicais. Em 2023, a produção mundial atingiu 171,3 milhões de sacas de 60 kg (ICO, 2023). O Brasil lidera como o maior produtor, seguido pelo Vietnã e Colômbia, e também como o segundo maior consumidor, após os Estados Unidos (Conab, 2023; ICO, 2023).

No Brasil, o estado da Bahia ocupa a quarta posição na produção de café, com valores entre 3,6 e 4,1 milhões de sacas beneficiadas (Conab, 2023). Destaca-se a contribuição dos agricultores familiares da Chapada Diamantina e do sudoeste baiano para a crescente relevância da Bahia no cenário nacional, devido à qualidade dos grãos produzidos.

Existem mais de cem espécies do gênero *Coffea*, porém as que possuem maior produção e interesse econômico são *Coffea arabica* e *Coffea canephora*. Na Bahia, existem áreas de produção destas duas espécies. No Cerrado e Planalto (centro-sul, centro-norte e extremo-oeste baiano) ocorre a produção do café arábica e na região do Atlântico (sul da Bahia) se produz café conilon (Mapa, 2020). A primeira região citada apresenta características de topografia e clima favoráveis, boa luminosidade e investimentos no manejo agrícola, com destaque para lavouras nas microrregiões de Encruzilhada e Barra do Choça, com plantas em fase de floração e enchimento de grãos (Conab, 2020); e microrregião da Chapada Diamantina, com excelente desempenho na produção de cafés finos.

No Brasil, o sistema de cultivo sem arborização tem sido o mais comum, impulsionado pelas condições climáticas e de solo favoráveis do país. Apesar disso, a adoção do cultivo em sistemas agroflorestais tem se mostrado vantajosa em diversas áreas, resultando na geração de serviços ambientais, como o aumento da biodiversidade regional, além de benefícios socioeconômicos para os agricultores, especialmente pela produção de cafés especiais, altamente valorizados no mercado de commodities (Jaramillo-Botero et al., 2006).

Os sistemas arborizados não apenas aprimoram a qualidade do fruto e da bebida, mas também otimizam a eficiência no uso da água e do nitrogênio, reduzem a bienalidade e controlam tanto plantas daninhas quanto ataques do bicho-mineiro, além de contribuírem para a diminuição da temperatura do solo. Adicionalmente, esses sistemas favorecem o aumento ou manutenção da quantidade e qualidade dos resíduos vegetais

aportados, promovem a ciclagem de raízes (Chatterjee et al., 2018; Upson & Burgess, 2013) e propiciam o acúmulo de matéria orgânica no solo, especialmente em suas camadas mais superficiais (Du et al., 2022; Fahad et al., 2022). Essas práticas também resultam na redução das oscilações de umidade e temperatura, o que favorece um ambiente mais propício ao estabelecimento de uma fauna mais eficiente e diversificada (Pezzopane et al., 2010).

A diversidade vegetal ocasionada pelos sistemas agroflorestais, incluindo o seu componente arbóreo, promovem grande aporte de serapilheira e favorecem a ciclagem de nutrientes e também a sua disponibilidade na zona de absorção radicular das culturas associadas. Isso ocorre porque as raízes profundas das árvores podem interceptar os nutrientes lixiviados acumulados no subsolo, que normalmente encontram-se distantes da zona de absorção radicular das culturas, e, dessa forma, faz retorná-los à superfície na forma de serapilheira (Andrade et al., 2003). Além disso, a composição de espécies do sistema determina a quantidade, qualidade e diversidade dos resíduos na serapilheira, os quais regulam as interações da população de organismos edáficos, influenciando a velocidade de decomposição desses resíduos.

A serapilheira serve como um substrato imediatamente disponível para a comunidade saprofítica do solo, constituída por microrganismos e fauna edáfica (Krishna e Mohan, 2017). Sua qualidade é caracterizada pela proporção de compostos facilmente degradáveis e recalcitrantes, como frações solúveis, nutrientes, lignina, celulose, compostos fenólicos, carbono, substâncias estimulantes ou alelopáticas, os quais afetam a interação entre a biota e a serapilheira, influenciando assim a velocidade de decomposição da serapilheira.

Os sistemas de cultivo podem modificar diferentes atributos edáficos do solo, com destaque para o carbono orgânico do solo (COS), que está associado com vários processos relacionados com a sustentabilidade do ecossistema, como ciclagem de nutrientes, atividade biológica, densidade e estabilidade de agregados. A agregação envolve a união de várias partículas (areia, silte e argila) primárias do solo com compostos orgânicos e agentes cimentantes (Six et al., 2004), formando estruturas de diferentes formas e tamanhos, denominados de grandes macroagregados, macroagregados e microagregados.

Os grandes macroagregados, em particular, possuem tamanho superior a 2000 μm (Sun et al., 2024), são constituídos especialmente de resíduos de plantas, raízes e seus exsudatos, hifas e outras matérias orgânicas frescas e partículas minerais (Spohn e Giani, 2011) e podem sofrer ciclagem mais acelerada com o uso e manejo do solo mais intensivo

(Six et al., 2004; Peng et al., 2015). Os macroagregados atuam na proteção física do carbono orgânico do solo, por restringir a acessibilidade de microrganismos e evitar a decomposição (Dieckow et al., 2004; Parron et al., 2015; Peng et al., 2017; Rondon; Hernandez; Guzman, 2021; Zhao et al., 2023). A proteção física no interior de agregados é o principal mecanismo de estabilização do carbono no solo e possui papel importante na diminuição das emissões de CO₂ para a atmosfera, devido ao aumento da permanência do carbono no solo (Verchot et al., 2011).

A formação dos agregados do solo pode ocorrer por meio de processos fisiogênicos que inclui a adição de matéria orgânica, processos químicos e variações no teor de umidade do solo, ou por via biogênica pela atuação da macrofauna do solo e das raízes das plantas (Batista et al., 2013). Especificamente, a macrofauna edáfica participa da formação de agregados por meio da fragmentação e incorporação de resíduos vegetais ao solo (Bronick; Lal, 2005) e da formação de poros e galerias de diversas formas e tamanhos (Brussaard et al., 2007). Minhocas, térmitas e coleópteros tem influência direta na estrutura do solo, pois o deslocamento no solo e hábito alimentar desses indivíduos modificam o tamanho, distribuição e continuidade dos poros, que regulam a estabilidade de agregados do solo (Lee; Wood, 1971; Baretta et al., 2011; Meurer et al., 2020).

Os processos envolvidos na transformação da serapilheira e armazenamento de carbono no solo são importantes para conhecer o potencial de sequestro de carbono nos diferentes sistemas produtivos de café. Além disso, como o carbono orgânico do solo possui ligação com a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas no solo, o conhecimento do estoque de COS e sua distribuição em frações da matéria orgânica é fundamental para caracterizar e monitorar a sustentabilidade de sistemas produtivos (Bongiorno et al., 2019).

Estudos têm evidenciado que os SAFs de café ampliam o potencial de sequestro de carbono quando comparados aos cultivos agrícolas convencionais, ressaltando, assim, sua relevância na agricultura brasileira e seu potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Em um estudo conduzido por Barreto et al. (2011) com sistemas agroflorestais de cacau no estado da Bahia, Brasil, a uma profundidade de 0-50 cm, foi concluído que os SAFs desempenham um papel significativo na proteção ambiental, contribuindo para a redução dos impactos negativos do efeito estufa por meio do armazenamento de elevadas quantidades de carbono orgânico no solo.

Monroe et al. (2016), em um estudo realizado com sistemas agroflorestais de cacau no mesmo estado, em uma profundidade de 0-100 cm, observaram que os SAFs de

cacau e seringueira foram os mais eficazes no acúmulo de carbono orgânico do solo nos primeiros 20 cm e, conseqüentemente, até uma profundidade de 100 cm. Bastos et al. (2023), ao investigarem sistemas agroflorestais de café no município de Barra do Choça-BA, Brasil, em uma profundidade de 0-10 cm, não observaram redução no carbono orgânico do solo em comparação com a floresta nativa.

Além disso, Gama-Rodrigues et al. (2011), em um estudo realizado com sistemas agroflorestais de cacau no estado da Bahia, Brasil, identificaram que esses sistemas foram capazes de armazenar 302 Mg de carbono por hectare até uma profundidade de 1 metro. Por sua vez, Tumwebaze e Byakagaba (2016), ao investigarem sistemas agroflorestais de Café arábica e Café canephora em Uganda, observaram que, ao serem consorciados com árvores frutíferas como *Artocarpus heterophyllus* e *Mangifera indica*, ocorreu um armazenamento de carbono orgânico do solo de 54,01 tC/ha para o Café arábica e 49,635 tC/ha para o Café canephora, ambos em uma profundidade de 0-30 cm. Adicionalmente, Chatterjee et al. (2020), em uma pesquisa realizada com sistemas agroflorestais de Café arábica na região de Turrialba, Costa Rica, identificaram que o estoque de COS foi mais elevado sob floresta, alcançando 146,6 Mg C ha⁻¹ até uma profundidade de 1 metro.

Em consonância com esses benefícios ambientais e econômicos, os sistemas agroflorestais de café podem ser explorados em iniciativas de créditos de carbono para mercados voluntários (Tumwebaze e Byakagaba, 2016). Por meio da valoração econômica do carbono no solo nos sistemas agroflorestais de café, os agricultores têm a oportunidade direta de obter benefícios financeiros participando de iniciativas de créditos de carbono em mercados voluntários. Essa abordagem reconhece o valor dos serviços ecossistêmicos prestados pelos sistemas agroflorestais de café, incentivando práticas sustentáveis e fornecendo incentivos financeiros aos agricultores que contribuem para a captura e armazenamento de carbono no solo.

Diante do exposto, formulamos as seguintes hipóteses: (1) os sistemas de cultivo de café, especialmente os sistemas agroflorestais biodiversificados, têm um impacto positivo no acúmulo de carbono no solo, na diversidade da macrofauna edáfica e na formação de agregados do solo; e (2) a diversificação dos sistemas de cultivo de café resulta em vantagens econômicas e ambientais superiores, evidenciadas por uma valoração econômica ampliada dos serviços ecossistêmicos oferecidos, incluindo o sequestro de carbono, em comparação com os sistemas de monocultivo convencionais. Nesse contexto, o objetivo deste estudo é quantificar o impacto dos diferentes sistemas de cultivo de café no armazenamento de carbono no solo, na biodiversidade da

macrofauna edáfica, na distribuição dos agregados do solo e na valoração econômica desses sistemas em termos de serviços ecossistêmicos e sequestro de carbono.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, A. G. de; Tavares, S. R. de L.; Coutinho, H. L. da C. A contribuição da serapilheira para a recuperação de áreas degradadas e para manutenção da sustentabilidade de sistemas agroecológicos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 24, n. 22, p. 55-56, 2003.
- Barreta, D.; Santos, J.C.P.; Segat, J.C.; Geramia, E.V.; Oliveira Filho, L.C.I. de.; Alves, M.V. Fauna edáfica e qualidade do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, v.7, p. 119-170, 2011.
- Barreto, P. A. B.; Gama-Rodrigues, E. F.; Gama-Rodrigues, A. C.; Fontes, A. G.; Polidoro, J.C.; Moço, M. K. S.; Machado, R. C. R.; Baligar, V. C. Distribution of oxidizable organic C fractions in soils under cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. **Agroforestry systems**, Heidelberg, v. 81, n. 3, p. 213–220, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9300-4>.
- Bastos, T.R. dos S.; Barreto-Garcia, P. A.B.; de Carvalho, I. M.; Monroe, P.H. M., Carvalho, F. F. De. Response of soil microbial biomass and enzyme activity in coffee-based agroforestry systems in a high-altitude tropical climate region of Brazil. **CATENA**, 230, 107270, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107270>.
- Batista, I.; Correia, M.E.F.; Pereira, M.G.; Bieluczyk, W.; Schiavo, J.A.; Mello, N.A.D. Caracterização dos agregados em solos sob cultivo no cerrado, MS. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 4, p. 1535–1548, 2013. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n4p1535>.
- Bongiorno, G.; Bünemann, E. K.; Oguejiofor, Chidinma, U.; Meier, J.; Gort, G.; Comans, R.; Mäder, P.; Brussaard, L.; Goede, R. de. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. **Ecological Indicators**, v. 99, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.008>.
- Bronick, C. J.; Lal, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1, p. 3–22, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>.
- Brussaard, L.; Pulleman, M.M.; Ouédraogo, É.; Mando, A.; Six, J. Soil fauna and soil function in the fabric of the food web. **Pedobiologia**, v. 50, n. 6, p. 447–462, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2006.10.007>.
- Chatterjee, N.; Nair, P. K. R.; Chakraborty, S.; Nair, V. D. Changes in soil carbon stocks across the Forest-Agroforest-Agriculture/Pasture continuum in various agroecological regions: A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 266, 55–67, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.07.014>.
- Chatterjee, N.; Nair, P.K.R.; Nair, V.D. Viswanath, S.; Bhattacharjee, A.; Depth

distribution of soil carbon stock in aggregate size fractions under shaded perennial agroforestry systems in the Western Ghats of Karnataka, India. **Agroforest Systems**, v.94, p.341–358, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00399-z>.

CONAB. Conab - Boletim da Safra de Café., 2023. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe>.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: café – Safra 2020, n. 1 - Primeiro levantamento, Brasília, p. 1-62, janeiro 2020. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>.

Dieckow, J.; Bayer, C.; Martin-Neto, L.; Mielniczuk, J. Sistemas Conservacionistas de Preparo do Solo e Implicações no Ciclo do Carbono. - Portal Embrapa, 2004. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/30484/sistemas-conservacionistas-de-preparo-do-solo-e-implicacoes-no-ciclo-do-carbono>.

Du, X.; Jian, J.; Du, C.; Stewart, R. D. Conservation management decreases surface runoff and soil erosion. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 10, n. 2, p. 188–196, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.08.001>.

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**, 14, 14877, 2022. <https://doi.org/10.3390/su142214877>.

Gama-Rodrigues, E.F.; Gama-Rodrigues, A.C.; Nair, P.K.R. Soil Carbon Sequestration in Cacao Agroforestry Systems: A Case Study from Bahia, Brazil, in: Kumar, B.M.; Nair, P.K.R. (Eds.), Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems: Opportunities and Challenges, Advances in Agroforestry. **Springer Netherlands**, Dordrecht, p. 85–99, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1630-8>.

ICO. Relatórios Especializados | Organização Internacional do Café, 2023. Disponível em: <https://icocoffee.org/pt/specialized-reports/>.

Jaramillo-Botero, C.; Martinez, H. E. P.; Santos, R. H. S. Características do café (*Coffea arabica* L.) sombreado no norte da América Latina e no Brasil: análise comparativa. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 2, p. 94-102, 2006.

Krishna, M.P.; Mohan, M. Litter decomposition in forest ecosystems: a review. **Energy, Ecology and Environment**. 2, p. 236–249, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40974-017-0064-9>.

Lee, K. E.; Wood, T.G. Termites and Soils By K. E. Lee and T. G. Wood London: Academic Press (1971), pp. 251, £4. **Experimental Agriculture**, v. 8, n. 3, p. 281–281, 1971. <https://doi.org/10.1017/S0014479700005354>.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Política. Agrícola. Sumário Executivo Café, julho 2020.

Meurer, K.; Barron, J.; Chenu, C.; Coucheney, E.; Fielding, M.; Hallett, P.; Herrmann,

A.M.; Keller, T.; Koestel, J.; Larsbo, M.; Lewan, E.; Or, D.; Parsons, D.; Parvin, N.; Taylor, A.; Vereecken, H.; Jarvis, N. A framework for modelling soil structure dynamics induced by biological activity. **Global Change Biology**, v. 26, n. 10, p. 5382–5403, 2020. <https://doi.org/10.1111/gcb.15289>.

Monroe, P.H.M., Gama-Rodrigues, E.F., Gama-Rodrigues, A.C., Marques, J.R.B. Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in SouthernBahia, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. 221, p. 99–108, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.022>.

Parron, L.M., Garcia, J.R., de Oliveira, E.B., Brown, G.G., Prado, R.B., 2015. Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica.

Peng, X.; Zhu, Q.; Zhang, Z.; Hallett, P. D. Combined turnover of carbon and soil aggregates using rare earth oxides and isotopically labelled carbon as tracers. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 109, p. 81–94, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.02.002>.

Peng, X.; Horn, R.; Hallett, P. Soil structure and its functions in ecosystems: Phase matter & scale matter. **Soil and Tillage Research**, v. 46, p. 1–3, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.017>.

Pezzopane, J.R.M.; Marsetti, M.M.S; Souza, J.M.; Pezzopane, J.E.M. Condições microclimáticas em cultivo de café conilon a pleno sol e arborizado com noqueira macadamia. **Ciência Rural**, v. 40, p. 1257–1263, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010005000098>.

Rondon, T.; Hernandez, R. M.; Guzman, M. Soil organic carbon, physical fractions of the macro-organic matter, and soil stability relationship in lacustrine soils under banana crop. **PLOS ONE**, v. 16, n. 7, p. e0254121, 2021. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254121>.

Six, J.; Bossuyt, H.; Degryze, S.; Denef, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 1, Advances in Soil Structure Research, p. 7–31, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>.

Spohn, M.; Giani, L. Impacts of land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 5, p. 1081–1088, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.01.029>.

Sun, X.; Xing, Y.; Yan, G.; Liu, G.; Wang, X.; Wang, Q. Dynamics of glomalin-related soil protein and soil aggregates during secondary succession in the temperate forest. **CATENA**, v. 234, p. 107602, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107602>.

Tumwebaze, S. B.; Byakagaba, P. Soil organic carbon stocks under coffee agroforestry systems and coffee monoculture in Uganda. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 216, p. 188–193, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.037>.

Verchot, L.V.; Dutaur, L.; Shepherd, K.D.; Albrecht, A. Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils. **Geoderma**, v. 161, n. 3, p. 182–193, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.017>.

Upton, M. A.; Burgess, P. J. Soil organic carbon and root distribution in a temperate arable agroforestry system. **Plant Soil**, v. 373, p. 43-58, 2013.

<https://doi.org/10.1007/s11104-013-1733-x>.

Zhao, Z.; Mao, Y.; Gao, S.; Lu, C.; Pan, C.; Li, X. Organic carbon accumulation and aggregate formation in soils under organic and inorganic fertilizer management practices in a rice–wheat cropping system. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 3665, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30541-y>.

3. ARTIGO I

A diversificação de sistemas agroflorestais de café influencia a interação entre carbono, agregados e fauna da camada superficial do solo*

* **Situação:** submetido

A diversificação de sistemas agroflorestais de café influencia a interação entre carbono, agregados e fauna do solo

Monalisa Fagundes Oliveira^a, Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia^b, Paulo Henrique Marques Monroe^b

^a Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Estrada do Bem Querer, Km 4, Caixa Postal 95, 45083-900 Vitória da Conquista, Bahia, Brasil.

^b Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB, Departamento de Engenharia Agrícola e Solos, Estrada do Bem Querer, Km 4, Caixa Postal 95, 45083-900 Vitória da Conquista, Bahia, Brasil.

Autor para correspondência: monalisaffagundes@gmail.com

RESUMO

A diversificação de sistemas agroflorestais favorece a comunidade da fauna edáfica, a formação de agregados e, como consequência, pode exercer influência significativa na proteção física do carbono orgânico do solo. Embora estudos em sistemas agroflorestais (SAFs) de café indiquem impactos positivos decorrentes dessa diversificação, a relação precisa entre fauna edáfica, agregação e proteção do carbono ainda necessita de esclarecimentos, especialmente quando se considera as variações nas entradas de resíduos orgânicos. Assim, desenvolvemos este trabalho buscando responder às seguintes questões: “Como a macrofauna influencia os agregados dos solos nos sistemas agroflorestais de café e no consórcio de café com gramínea forrageira?” e “A adição de resíduos vegetais sobre o solo regula a interação entre a fauna edáfica e os agregados, alterando a magnitude do armazenamento do carbono no solo e sua distribuição em classes de agregados?”. O estudo foi conduzido no município de Ibicoara-BA, Brasil. Foram avaliados três SAFs biodiversos (SAF-MB: café consorciado com mogno e banana; SAF-SPM: café com sibipiruna, paricá e mogno; e SAF-BMG: café com cedro, banana, mangueira, castanha-do-pará, grevilea, fruta-pão, cinamomo e mogno) e um consórcio de café com *Brachiaria* spp (CF). Foram coletadas amostras de solo (profundidade 0-10 cm), as quais foram fracionadas em classes de agregados em campo, obtendo-se quatro classes de tamanho: > 6 mm, 6-4 mm, 4-2 mm e <2 mm. Para classificação morfológica, foram utilizados os agregados >6 mm. Os resultados evidenciaram uma não variação na densidade total dos indivíduos entre os tratamentos. Todos os sistemas de café estudados aumentaram ou mantiveram os estoques de carbono total do solo em relação à floresta nativa. O sistema SAF-MB destacou-se com estoque de serapilheira total e outros componentes da serapilheira semelhantes à FN. O SAF-BMG apresentou o maior percentual da fração de agregados > 6 mm, enquanto o SAF-SPM teve a maior proporção da fração < 2 mm. O CF teve maiores valores de massa de raízes comparado aos demais sistemas em algumas classes de agregados. Não foram encontradas diferenças significativas na densidade total de indivíduos entre os sistemas. Ademais, os resultados deste estudo apoiam a hipótese de que sistemas agroflorestais com maior diversidade de espécies favorecem as entradas de resíduos vegetais, aumentando a abundância da fauna, formação de agregados biogênicos e estoque de carbono, tornando-os semelhantes à floresta nativa. Por outro lado, o consórcio de café com gramínea forrageira demonstrou impactos positivos na diversidade da fauna e formação de agregados > 6 mm pela maior influência das raízes.

Palavras-chave: *Coffea arabica*; Matéria orgânica do solo; Sistemas biodiversos; Serapilheira.

The diversification of agroforestry coffee systems influences the interaction between carbon, aggregates, and soil fauna

Monalisa Fagundes Oliveira^a, Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia^b, Paulo Henrique Marques Monroe^b

^a State University of Southwest Bahia - UESB, Graduate Program in Agronomy, Estrada do Bem Querer, Km 4, PO Box, 45083-900, Vitória da Conquista, Bahia, Brazil.

^b State University of Southwest Bahia- UESB, Department of Agricultural Engineering and Soil, Estrada do Bem Querer, Km 4, PO Box 95, 45031-900, Vitória da Conquista, Bahia, Brazil.

Corresponding author: monalisaffagundes@gmail.com

ABSTRACT

The diversification of agroforestry systems enhances edaphic fauna community, aggregate formation, and, consequently, may exert significant influence on the physical protection of soil organic carbon. Although studies in coffee agroforestry systems (AFS) indicate positive impacts resulting from this diversification, the precise relationship between soil fauna, aggregation, and carbon protection remains unresolved, especially when considering variations in organic residue inputs. Thus, we conducted this study aiming to answer the following questions: "How does soil macrofauna influence soil aggregates in coffee agroforestry systems and coffee-grass consortium?" and "Does the addition of plant residues to the soil regulate the interaction between edaphic fauna and aggregates, altering the magnitude of carbon storage in the soil and its distribution across classes of aggregates?" The study was conducted in the municipality of Ibicoara-BA, Brazil. Three biodiverse AFS were evaluated (AFS-MB: coffee intercropped with mahogany and banana; AFS-SPM: coffee with sibipiruna, parica, and mahogany; and AFS-BMG: coffee with cedar, banana, mango, Brazil nut, silk oak, breadfruit, chinaberry, and mahogany) and a coffee consortium with *Brachiaria* spp (CF). Soil samples (depth 0-10 cm) were collected and fractionated into aggregate classes in the field, resulting in four size classes: > 6 mm, 6-4 mm, 4-2 mm, and <2 mm. For morphological classification, aggregates >6 mm were used. The results showed no variation in total density of individuals among treatments. All coffee systems studied increased or maintained total soil carbon stocks compared to native forest. The AFS-MB system stood out with total litter stock and other litter components similar to NF. AFS-BMG presented the highest percentage of the fraction of aggregates > 6 mm, while AFS-SPM had the highest proportion of the fraction < 2 mm. CF had higher root mass values compared to the other systems in some aggregate classes. No significant differences were found in the total density of individuals among systems. Furthermore, the results of this study support the hypothesis that agroforestry systems with greater species diversity favor inputs of plant residues, increasing fauna abundance, biogenic aggregate formation, and carbon stock,

making them similar to native forest. However, the coffee-grass consortium demonstrated positive impacts on fauna diversity and formation of aggregates > 6 mm due to the greater influence of roots.

Keywords: *Coffea arabica*; Soil organic matter; Biodiverse systems; Litter.

3.1 INTRODUÇÃO

O café (*Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* P.) é uma das principais *commodities* do Brasil, país que ocupa a posição de maior exportador de café do mundo e de segundo maior consumidor da bebida (Conab, 2023). O sistema de cultivo de café predominante é o monocultivo (condução das plantas a pleno sol), que é favorecido pelas condições edafoclimáticas do país. No entanto, muitas áreas empregam o cultivo em sistemas agroflorestais (cafezais arborizados), que proporciona diversas vantagens, desde a melhoria da qualidade do fruto e redução do índice de bienalidade (Ricci et al., 2004; Staver et al., 2001; Bote e Struik, 2011) até o aumento das entradas de resíduos vegetais (serapilheira e raízes) e acúmulo de matéria orgânica no solo, especialmente nas camadas mais superficiais (Du et al., 2022; Fahad et al., 2022).

A adição constante de matéria orgânica nos sistemas agroflorestais (SAFs) favorece a agregação e armazenamento de carbono no solo. A agregação é a união de várias partículas primárias do solo com compostos orgânicos e agentes cimentantes (Six et al., 2004), formando estruturas de diferentes formas e tamanhos, denominados de macroagregados (> 0,25 mm) e microagregados (<0,25 mm). Os macroagregados, em particular, podem ser fracionados em três classes de tamanho: maior do que 2 mm (grandes), entre 2-1 mm (médios) e entre 1-0,25 mm (pequenos) (Kemper e Rosenau, 1986; Sun et al., 2024). Os macroagregados grandes, por sua vez, também podem ser separados por classes de tamanho (>6 mm, 6-4 mm, 4-2 mm), que permitem avaliar a estrutura e armazenamento de carbono no solo. Estes agregados são constituídos especialmente de resíduos de plantas, raízes e seus exsudatos, hifas e outras matérias orgânicas frescas e partículas minerais (Spohn e Giani, 2011) e podem sofrer ciclagem mais acelerada de acordo com o uso e manejo do solo mais intensivo (Six et al., 2004; Peng et al., 2015). Atuam na proteção física do carbono orgânico do solo, por restringir a acessibilidade de microrganismos, evitando a decomposição da matéria orgânica (Dieckow et al., 2004; Parron et al., 2015; Peng et al., 2015; Rondon et al., 2021; Zhao et

al., 2023).

Os agregados do solo podem ser formados por via fisiogênica, que envolve a adição de matéria orgânica, fatores químicos e ciclos de umedecimento e secagem do solo ou por via biogênica, que tem participação significativa da macrofauna do solo e também das raízes das plantas (Batista et al., 2013). A macrofauna edáfica participa da formação de agregados dada a sua atuação na fragmentação e incorporação de resíduos vegetais ao solo (Bronick e Lal, 2005) e na formação de poros e galerias de diversas formas e tamanhos (Brussaard et al., 2007). Especificamente minhocas, térmitas e coleópteros exercem uma grande influência na estrutura do solo, pois a sua ação modifica o tamanho, distribuição e continuidade dos poros, que influenciam a estabilidade de agregados do solo (Baretta et al., 2011; Lee e Wood, 1971; Meurer et al., 2020).

O aumento da diversidade de plantas em sistemas de uso da terra multiestrata, como os SAFs biodiversos, pode favorecer o estabelecimento da fauna do solo pelo aumento da disponibilidade e diversidade de nichos e recursos alimentares e melhoria das condições microclimáticas (Marsden et al., 2020; Zhang et al., 2022; Insfrán Ortiz et al., 2023). Muitos estudos têm comprovado a influência positiva de SAFs de café na fauna edáfica e em vários outros atributos do solo de forma isolada. No entanto, os efeitos desses sistemas na relação entre a fauna edáfica e a dinâmica de agregação e proteção física do carbono do solo ainda não foram equacionados, especialmente quando se considera a influência de variações nas entradas de resíduos orgânicos. A análise conjunta desses atributos é crucial para uma compreensão global de aspectos relacionados à dinâmica da matéria orgânica no solo em resposta ao aumento da diversidade de espécies de plantas em sistemas de cultivo de café, contribuindo para uma visão mais completa da sustentabilidade desses sistemas.

Nesse cenário, realizamos a análise de amostras de solo provenientes de quatro sistemas de cultivo de café, três caracterizados como sistemas agroflorestais biodiversos e o quarto como consórcio de café com gramínea forrageira. Uma floresta nativa foi utilizada como sistema de referência na condução do estudo. Assim, desenvolvemos este trabalho buscando responder às seguintes questões: “Como a macrofauna influencia os agregados dos solos nos sistemas agroflorestais de café e no consórcio de café com gramínea forrageira?” e “A adição de resíduos vegetais sobre o solo regula a interação entre a fauna edáfica e os agregados, alterando a magnitude do armazenamento do carbono no solo e sua distribuição em classes de agregados?”. E, considerando tais perguntas, levantamos as seguintes hipóteses: (1) sistemas agroflorestais biodiversos de

café são postulados como otimizadores de entradas de resíduos vegetais (serapilheira e raízes), favorecendo fauna edáfica, formação de agregados e estoque de carbono, o que os tornam mais semelhantes à condição de floresta nativa; e (2) o consórcio de café com gramínea forrageira também impacta positivamente a fauna edáfica, agregação e proteção física do carbono no solo, mas em menor grau do que o SAFs biodiversos.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em plantações comerciais de café, localizadas no município de Ibicoara (Figura 1), estado da Bahia, região Nordeste do Brasil. A região tem altitude média de 1028 m e clima tropical de altitude (Cwb) segundo classificação de Köppen, com temperatura média de 20 °C e precipitação média anual de 977 mm. Todas as áreas de estudo tem relevo de plano a levemente ondulado, com declividade inferior a 10%, e estão sobre Argissolo Vermelho-Amarelo de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos, 2018) equivalente a Ultisol no sistema Americano *USDA Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 2014), apresentando características químicas e granulométricas conforme mostra a Tabela 1.

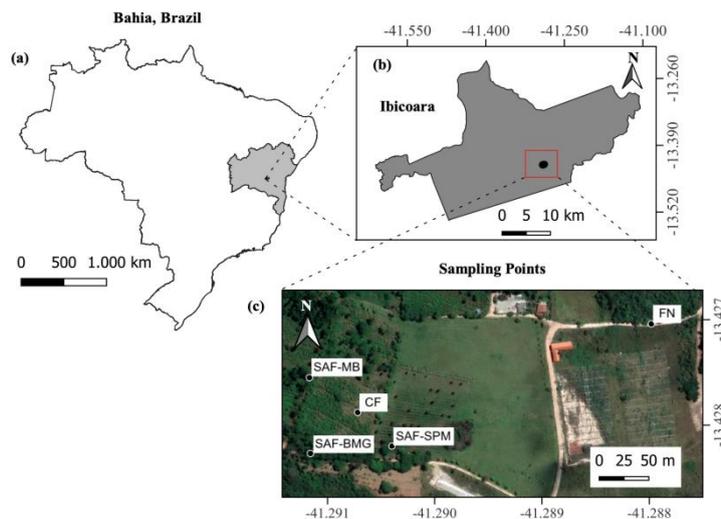


Figura 1 – Localização da área experimental no município de Ibicoara-BA, Brasil.

Tabela 1 - Caracterização química e física do solo (profundidade 0-10 cm) em quatro sistemas de cultivo de café e em floresta nativa.

Sistema	pH ⁽¹⁾	K	Ca	Mg	DS	Areia	Silte	Argila
		– cmol _c dm ⁻³ –			g cm ⁻³	— g kg ⁻¹ —		
CF	5,0	0,28	1,5	1,1	1,30	650	140	210
SAF-MB	6,4	0,82	5,0	2,2	1,48	710	80	210
SAF-SPM	6,6	0,77	3,2	2,3	1,73	650	130	220
SAF-BMG	6,6	0,46	4,6	2,2	1,57	700	90	210
FN	5,0	0,28	1,5	1,1	1,23	720	40	240

Em que: CF – consórcio de café com gramínea forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com mogno e banana; SAF-SPM – sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevilea, fruta-pão, cinamomo e mogno; FN – floresta nativa; e DS – densidade do solo. (1) Análises realizadas de acordo com Teixeira et al. (2017): pH (água); P e K extraíveis por Mehlich⁻¹; Ca, Mg e Al trocáveis por KCl 1 mol L⁻¹.

3.2.2 Desenho experimental

Os sistemas de cultivo de café avaliados nesta pesquisa foram três sistemas agroflorestais biodiversos, um consórcio de café com gramínea forrageira e uma área de vegetação nativa (Figura 2). Quais sejam: o CF – Consórcio de *Coffea arabica L.* com gramínea forrageira (*Brachiaria ssp.*), com 6 anos e coordenada geográfica: 13° 25' 40" S e 41° 17' 26" W; o SAF- MB – Sistema agroflorestal de *Coffea arabica L.* com mogno (*khaya grandifoliola*) e banana (*Musa spp.*), com 27 anos e coordenada geográfica: 13° 25' 39" S e 41° 17' 28" W; o SAF-SPM – Sistema agroflorestal de *Coffea arabica L.* com sibipiruna (*Caesalpinia pluviosa*), paricá (*Schizolobium amazonicum*) e mogno (*khaya grandifoliola*), com 6 anos e coordenada geográfica: 13° 25' 41" S e 41° 17' 25" W; o SAF-BMG – Sistema agroflorestal de *Coffea arabica L.* com cedro (*Toona ciliata*), banana (*Musa spp.*), cacau (*Theobroma cacao*), mangueira (*Mangifera indica*), castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa*), grevilea (*Grevillea robusta*), fruta-pão (*Artocarpus altilis*), cinamomo (*Melia azedarach*) e mogno (*Khaya grandifoliola*), com 8 anos e coordenada geográfica: 13° 25' 41" S e 41° 17' 28" W. As características de cada um

desses sistemas (distribuição e espaçamento entre plantas) são apresentadas na Figura 2.

A floresta nativa (FN) foi considerada como sistema de referência por representar a condição original da vegetação nativa da região, antes da implantação dos sistemas de cultivo, classificada como Floresta Estacional Decidual, com predominância de ecótipos da família Fabaceae. Está localizada próxima às plantações de café (13° 25' 36" S e 41° 17' 17" W) e tem cerca de 40 anos sem interferência antrópica. Trata-se de uma floresta com estrato arbóreo relativamente baixo (entre 10 e 15 m de altura) e estágio intermediário de regeneração de acordo com os critérios descritos na Resolução CONAMA 01/1994 (Brasil, 1994).

Os sistemas de café foram implantados após preparo do solo com aração e gradagem, em áreas que anteriormente eram cultivadas com cafezais e pastagens (*Brachiaria* ssp.) por cerca de 40 anos. Todos os sistemas foram estabelecidos com adubação de plantio (5 L planta⁻¹ de esterco bovino e 150 g planta⁻¹ de superfosfato simples). As adubações de cobertura foram realizadas com 0,6 kg planta⁻¹ de NPK 25-05-20 três vezes ao ano até 2008 e, após esse período, com 9,0 kg planta⁻¹ de compostos orgânicos (mistura de esterco de caprino, palha do próprio café, vagens trituradas de sibipiruna e leucena, cinzas e frutas decompostas), divididos em três aplicações. O controle de ervas espontâneas foi realizado por meio de utilização de roçadeira motorizada de duas a três vezes ao ano.

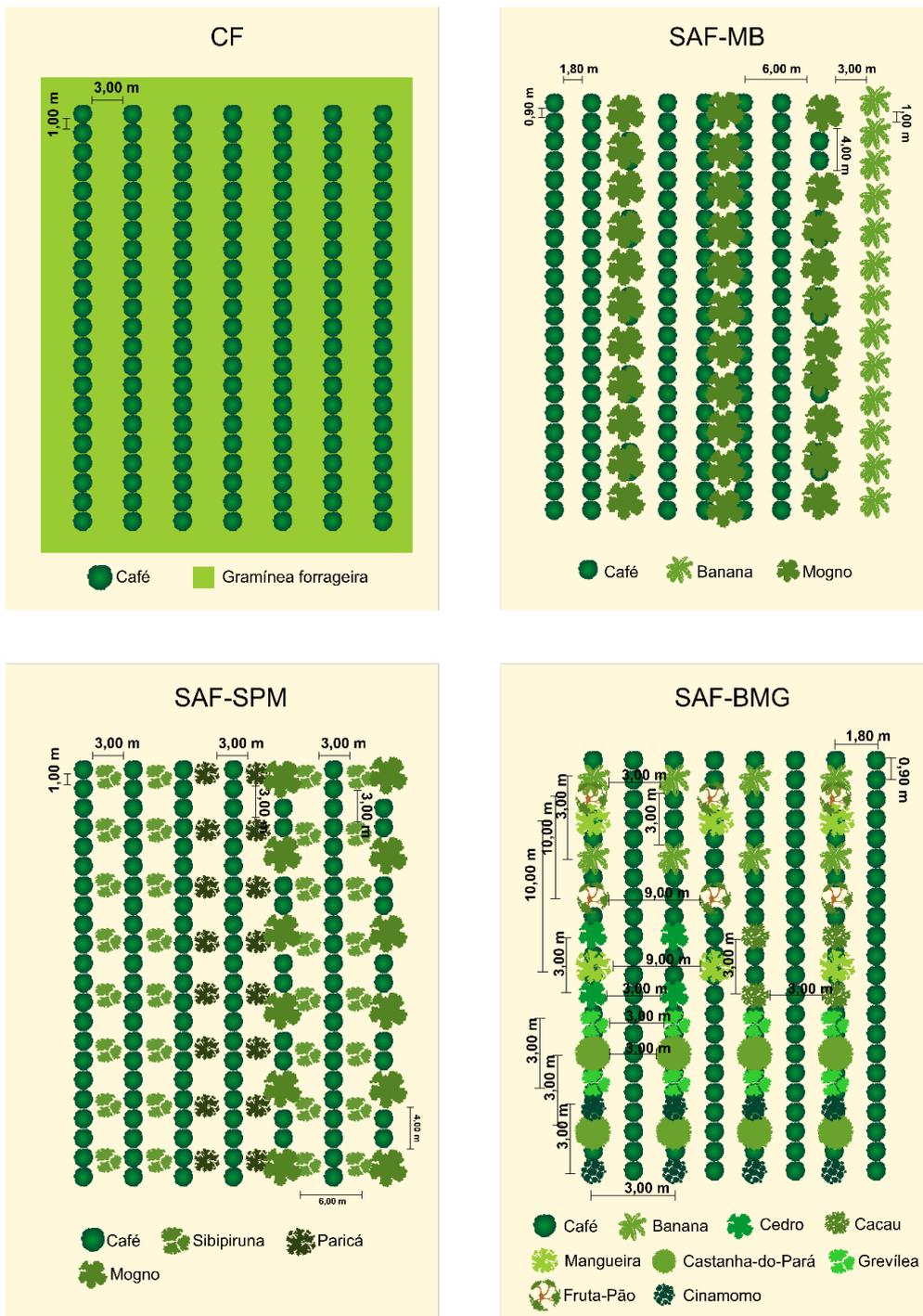


Figura 2 – Esquema do arranjo espacial de quatro sistemas de cultivo de café e floresta nativa do município de Ibicoara-BA, Brasil.

3.2.3 Amostragem de serapilheira e solo

As amostras de solo e serapilheira foram coletadas em setembro de 2021. Para isso, em cada sistema de cultivo de café e floresta nativa foram delimitadas aleatoriamente quatro parcelas de 30 × 30 m, garantindo uma distância mínima de 10 metros entre as

parcelas. A decisão de trabalhar com este desenho de amostragem foi baseada em estudos anteriores que adotaram desenho semelhante para avaliar o efeito do uso da terra em propriedades do solo (Barreto-Garcia et al., 2021; Francaviglia et al., 2017; Matos et al., 2020; Nascimento et al., 2021; Oliveira et al., 2022; Bastos et al., 2023), nos quais essa abordagem foi importante para estudar sistemas de longo prazo que não permitiam a instalação prévia de ensaios de campo replicados e randomizados.

A amostragem de serapilheira foi realizada em cada parcela com o auxílio de uma moldura de madeira, com 0,5 m × 0,5 m (0,25 m²). A moldura foi lançada de forma aleatória/estratificada nos sistemas de café, a qual consistiu na combinação de amostras coletadas em diferentes posições dos sistemas (nos SAFs: linha do café, linha das árvores e entrelinhas do cafeeiro e das árvores; no consórcio de café: linha e entrelinhas de plantio). Na FN, a amostragem foi realizada de forma aleatória, uma vez que não havia necessidade de estratificação. O material circunscrito à moldura foi retirado de forma cuidadosa para evitar a coleta de solo e raízes vivas. Após a coleta, as amostras foram separadas em quatro frações (folhas, material lenhoso: galhos + cascas, estruturas reprodutivas e material fragmentado) e secas em estufa de ventilação forçada a 60 °C, até atingir massa seca constante, pesadas e moídas em moinho de facas para avaliação da composição orgânica (lignina, polifenóis e celulose). Os resultados de massa seca (g) obtidos foram convertidos para Mg ha⁻¹.

A amostragem de solo foi realizada com a retirada de monólitos de solo com dimensões de 0,25 × 0,25 m, na profundidade 0-10 cm. No total, foram coletadas quatro repetições para o fracionamento em classes de agregados e oito repetições para avaliação da macrofauna em cada sistema estudado. Os monólitos foram retirados aleatoriamente dentro de cada parcela, abaixo da saia do cafeeiro, garantindo pelo menos 10 m de distância entre os pontos de amostragem. Também foram coletadas amostras indeformadas de solo, com auxílio de anel volumétrico para determinação da densidade do solo, as quais foram pesadas e depois secas em estufa a 105 °C por 48 h (Teixeira et al., 2017).

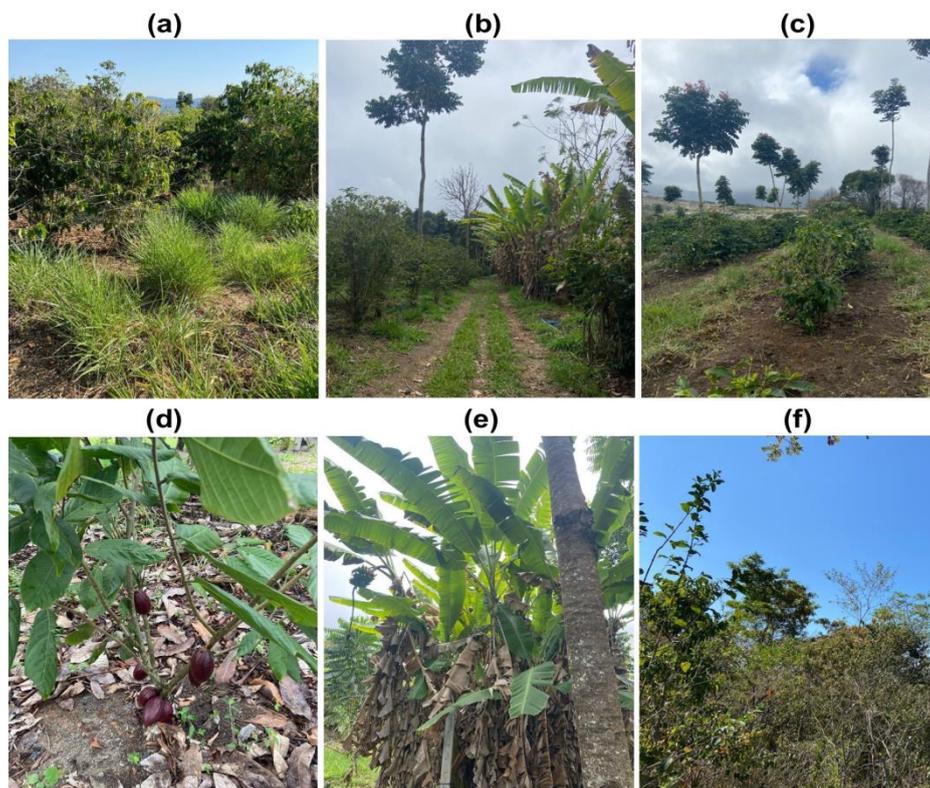


Figura 3 – Visão externa dos sistemas de cultivo de café e vegetação nativa: (a) consórcio de café com gramínea forrageira, (b) sistema agroflorestal de café com banana e mogno, (c) sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno, (d) e (e) sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevílea, fruta-pão, cinamomo e mogno e (f) floresta nativa

3.2.4 Composição orgânica da serapilheira

As amostras de serapilheira foram analisadas para determinação dos teores de lignina e celulose pelo método da fibra em detergente ácido (FDA) (Van Soest e Wine 1968), e para a determinação de polifenóis pelo método do reagente de Folin-Denis em meio básico (Anderson e Ingram, 1996).

3.2.5 Fracionamento físico em classe de agregados

O fracionamento das amostras de solo de cada monólito foi realizado por peneiramento em campo, empregando-se um conjunto de peneiras com malhas de 6, 4 e 2 mm (Aziz e Karim, 2016; Yang et al., 2019; Chellappa et al., 2021). O peneiramento foi realizado de forma manual, com agitação por um minuto em movimentos horizontais de cima para baixo (de aproximadamente 4 cm de amplitude), obtendo-se quatro classes de agregados: maiores que 6 mm (> 6 mm), entre 6 e 4 mm (6-4 mm), entre 4 e 2 mm (4-

2 mm) e menores que 2 mm (< 2 mm). O tempo de peneiramento foi determinado para evitar o arredondamento dos agregados maiores que 6 mm, os quais foram classificados de acordo com seu formato. Durante os testes de campo, foi observado que períodos de peneiramento mais longos resultaram em uma porcentagem maior de agregados biogênicos devido ao arredondamento excessivo. Posteriormente, as classes de agregados foram levadas à estufa de circulação de ar, à 60 °C, até a obtenção de massa seca constante e pesada, determinando-se sua porcentagem relativa. As aberturas das peneiras foram definidas com base em estudos da literatura relacionada (Fontana et al., 2010; Batista et al., 2013; Loss et al., 2020; Nascimento, 2021; Yan et al., 2023).

3.2.6 Avaliação morfológica

A avaliação morfológica dos agregados foi realizada na classe de maior tamanho (> 6 mm), utilizando-se 100 g das amostras. Os agregados foram observados sob lupa e separados em três frações morfológicas, conforme as definições de Bullock et al. (1985): (1) agregados fisiogênicos – apresentam formas angulares; (2) agregados biogênicos – apresentam formas arredondadas provenientes da passagem pelo trato intestinal de indivíduos da macrofauna do solo, principalmente minhocas, ou pela visualização de raízes; e (3) agregados intermediários – possuem forma indefinida, podem ter passado pela via biogênica de formação, porém tiveram perda da forma arredondada pelo envelhecimento ou pela via fisiogênica. Após essa separação, cada classe dos agregados foi seca em estufa a 60 °C até a obtenção de massa constante e pesada.

3.2.7 Raízes finas

A quantificação das raízes finas foi realizada nas classes de agregados >6 , 6-4 e 4-2 mm. Para isso, 100 g de cada uma das classes foram colocados sobre uma peneira de 2 mm, destorroados manualmente e lavada com água corrente até que restassem somente as raízes. Após a separação, as raízes foram secas em estufa de ar forçado a 65°C, por 48 horas e pesadas em balança semi-analítica.

3.2.8 Carbono total e carbono lábil do solo

O carbono total do solo (CT) foi determinado por combustão seca no analisador elementar automatizado Perkin-Elmer Series II 2400 (analisador CHNS/O). O carbono lábil do solo (CL) foi determinado por oxidação úmida com permanganato de potássio (KMnO_4) $0,033 \text{ mol L}^{-1}$, conforme a metodologia de Blair et al. (1995), adaptada por Shang e Tiessen (1997). O estoque de carbono total do solo foi calculado com base nos teores de carbono, densidade e espessura da camada de solo, que foi corrigida considerando a espessura da camada de solo do sistema de referência (floresta nativa), como proposto por Ellert e Bettany (1995).

3.2.9 Macrofauna edáfica

A amostragem da macrofauna do solo foi realizada pelo método *Tropical Soil Biology and Fertility* (TSBF) descrito por Anderson e Ingram (1993) com adaptação na profundidade. As amostras de solo foram colocadas em uma bandeja de plástico com fundo branco e os organismos visíveis a olho nu foram coletados com auxílio de uma pinça. Em seguida, os organismos foram acondicionados em recipientes contendo álcool a 70%. Os invertebrados foram contados e identificados em nível de grandes grupos taxonômicos, de acordo com Dindal (1990). Mediante a identificação da ordem de cada indivíduo da macrofauna do solo, foram calculados a densidade (número de indivíduos por m^2), riqueza (número de grupos identificados) e índices de diversidade de Shannon (H') e de equitabilidade de Pielou (J). No entanto, neste trabalho optamos por apresentar apenas os grupos mais abundantes, enquanto os demais grupos estão disponíveis como dados suplementares (Anexo I).

3.2.10 Análise estatística

Os dados foram testados quanto à normalidade (teste de Kolmogorov-Smirnov, 5%) e homogeneidade (teste de Bartlett, 5%). Os dados paramétricos (classes de agregados, carbono e serapilheira) foram submetidos à análise de variância e, posteriormente, as médias foram comparadas pelo teste de Fisher (LSD) a 5% de significância. Os dados não paramétricos (macrofauna edáfica) tiveram suas médias comparadas pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de significância.

De forma complementar, os dados do conjunto de variáveis foram submetidos à análise de componentes principais (ACP), com uso do *software* XLSTAT® versão 19.2.2 (Addinsoft, 2019). As variáveis utilizadas na ACP foram: riqueza da macrofauna edáfica,

densidade de Oligochaetas, Isopoda, Isoptera (três grupos dominantes e mais relacionados a bioturbação do solo), carbono orgânico e lábil do solo, estoque de carbono, agregados biogênicos, lignina da serapilheira, massa de raiz e serapilheira. Adicionalmente, a relação entre essas variáveis foi avaliada por meio da análise de correlação de Pearson a 5% de significância, empregando-se o *software* R® Studio (R Core Team, 2020), pacote corrplot (Wei e Simko, 2020). Este último *software* também foi utilizado para construção dos demais gráficos apresentados neste trabalho.

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Serapilheira, polifenóis, lignina, celulose, carbono total e lábil do solo

Os sistemas de café aumentaram ou mantiveram os estoques de carbono total do solo em relação à FN (Figura 4). Especificamente, o SAF-MB e o SAF-SPM apresentaram estoques superiores, enquanto o SAF-BMG e o CF não diferiram da FN. O estoque de CL não mostrou diferenças entre sistemas.

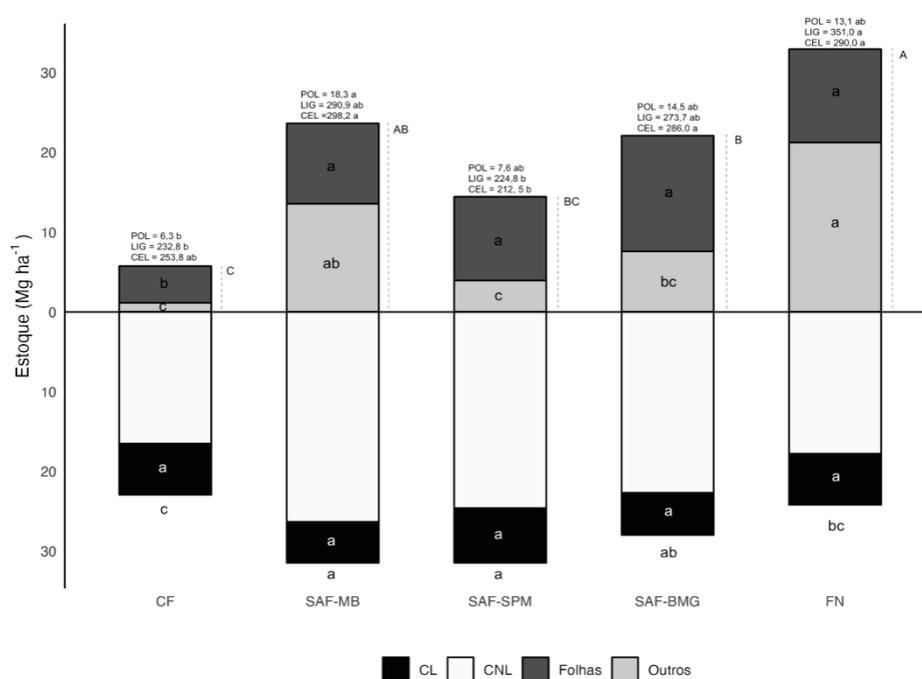


Figura 4 – Estoques de carbono lábil (CL) e carbono total do solo (CL+CNL) e atributos da serapilheira (teores de compostos orgânicos e estoques das frações folhas e outros) em quatro sistemas de cultivo de café e em floresta nativa. Em que: CF – consórcio de café com forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM

– sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevílea, fruta-pão, cinamomo e mogno; FN – floresta nativa. POL - polifenóis; LIG – lignina; CEL – celulose (g kg^{-1}). Letras iguais acima e abaixo das barras comparam os sistemas e não diferem entre si pelo teste Fisher LSD a 5% de significância. Letras abaixo das barras (na parte inferior do gráfico) correspondem aos estoques de carbono total do solo.

O SAF-MB não diferiu da FN quanto aos componentes serapilheira total e outros (Figura 4). Dentre os demais sistemas, o CF e o SAF-SPM foram os sistemas que apresentaram menores estoques, embora o SAF-SPM não tenha se diferenciado dos outros SAFs para o estoque total. O CF também apresentou estoque inferior da fração folhas tanto em relação a FN quanto em relação aos outros sistemas. Para a fração outros, apenas o SAF-MB se assemelhou à FN, enquanto os demais sistemas agroflorestais apresentaram valores inferiores.

Na composição relativa das frações da serapilheira, as folhas foram predominantes no SAF-SPM (76%), SAF-BMG (66%) e CF (82%), enquanto a fração outros ocupou maior proporção da serapilheira do SAF-MB (57%) e floresta nativa (64%). Estes últimos sistemas apresentaram em média 60% de folhas (Figura 4).

Os teores de polifenóis não mostraram diferenciação entre os sistemas de café e a floresta nativa, observando-se maior valor no SAF-MB quando comparado ao CF. Por sua vez, o SAF-SPM e CF tiveram menores teores de lignina da serapilheira do que a FN (Figura 4). Quanto à celulose, o SAF-MB e SAF-BMG tiveram maiores médias do que o SAF-SPM e não diferiram da floresta nativa (FN).

3.3.2 Agregados, raízes e carbono

A contribuição relativa das classes de agregados mostrou diferenças entre os sistemas estudados (Tabela 2). A classe > 6 mm representou mais de 40% dos agregados na maioria dos sistemas estudados, com exceção do SAF-SPM, onde essa classe representou 23%. De modo geral, as classes 6-4 mm e 4-2 mm representaram menor proporção dos agregados, enquanto a classe < 2 mm apresentou participação intermediária.

Ao comparar os sistemas quanto à distribuição das classes de agregados, observou-se que o SAF-BMG se destacou, apresentando o maior percentual da fração > 6 mm (76,03%) seguido do SAF-MB, que foi superior à FN e não diferiu do CF (Tabela 2). Por sua vez, as frações 6-4 e 4-2 mm mostraram redução em todos os sistemas de

cultivo estudados, com maior impacto negativo do SAF-BMG e do SAF-MB, embora este último não tenha diferido do CF. A classe <2 mm apresentou maior média no SAF-SPM e menor no SAF-BMG, com valores intermediários no CF e no SAF-MB, os quais não diferiram dos da FN.

A massa de raízes total da classe > 6 mm não variou entre os sistemas agroflorestais e a floresta nativa (Tabela 2). No entanto, os maiores valores de massa de raízes foram encontrados no CF em comparação aos demais sistemas. A classe 6-4 mm também mostrou maior massa de raízes no CF, mas este se diferenciou apenas do SAF-MB e SAF-BMG. Não houve variação na massa de raízes da fração de 4-2 mm.

Os teores de carbono nas classes de agregados >6 e 4-2 mm mostraram redução no SAF-MB e SAF-BMG, enquanto CF e SAF-SPM mantiveram valores semelhantes a FN (Tabela 2). Na classe 6-4 mm, nenhum dos sistemas de café se diferenciou da FN, no entanto SAF-MB e SAF-BMG apresentaram teores de carbono inferiores ao CF. Seguindo padrão semelhante, os teores de C lábil das classes >6, 6-4 e <2 mm evidenciaram menores valores no SAF-BMG, que não se distinguiu do SAF-MB (em todas as classes), do CF (na classe >6mm) e do SAF-SPM e da FN (na classe 6-4 mm) (Tabela 2).

Tabela 2 - Proporção de agregados (%), massa de raiz, teores de carbono lábil (CL) e carbono total (CT) e nitrogênio total (NT) dos agregados em quatro sistemas de cultivo de café e em floresta nativa.

Sistemas	Classes (mm)	Proporção (%)	Raízes	CT CL NT (g kg ⁻¹)		
				CT	CL	NT
CF	>6	48,3 Abc	10,73 a	25,83 abc	5,50 ab	5,75 b
	6-4	12,78 Cbc	1,61 a	33,13 a	5,58 a	6,42 ab
	4-2	12,82 Cbc	0,50 a	32,04 a	5,33 a	6,55 ab
	<2	26,05 Bb	-	22,75 a	5,37 ab	5,57 b
SAF-MB	>6	56,33 Ab	2,75 b	23,20 bc	4,63 ab	6,07 b
	6-4	10,15 Ccd	0,53 b	24,80 b	4,83 ab	6,12 b
	4-2	8,12 Ccd	0,31 a	24,60 b	4,29 a	6,02 bc
	<2	25,37 Bbc	-	23,63 a	4,42 bc	4,75 b

SAF-SPM	>6	22,87 Bd	2,18 b	29,30 ab	5,59 a	8,60 a
	6-4	14,25 Cb	0,86 ab	29,40 ab	5,84 a	8,57 a
	4-2	15,02 Cab	0,24 a	28,28 ab	5,72 a	8,67 a
	<2	47,97 Aa	-	26,13 a	5,97 a	8,77 a
SAF-BMG	>6	76,03 Aa	2,01 b	20,17 c	3,98 b	4,07 b
	6-4	7,03 Bd	0,36 b	22,67 b	3,97 b	4,32 b
	4-2	4,80 Bd	0,30 a	18,87 c	4,33 a	4,00 c
	<2	12,15 Bd	-	20,60 a	3,46 c	4,32 b
FN	>6	41,73 Ac	4,14 b	30,70 a	4,93 ab	5,32 b
	6-4	20,10 Ba	0,92 ab	29,55 ab	5,11 ab	5,17 b
	4-2	18,95 Ba	0,41 a	32,35 a	5,35 a	5,50 bc
	<2	19,25 Bc	-	19,93 a	5,34 ab	4,70 b

Em que: CF – consórcio de café com forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM – sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevilea, fruta-pão, cinamomo e mogno; e FN – floresta nativa. Letras iguais maiúsculas na coluna, que comparam as classes de agregados em cada sistema, e minúsculas, que comparam os sistemas em cada classe de agregado, não diferem entre si pelo teste de Fisher a 5% de significância.

Os teores de N total das classes de agregados não variaram entre a maior parte dos sistemas de cultivo de café e a floresta nativa. O SAF-SPM teve média superior aos demais tratamentos na classe >6 mm e <2 mm. Na classe 6-4 mm e 4-2 mm também foi superior aos demais, mas não diferiu do CF (Tabela 2). Em todas as classes estudadas, o teor de N dos demais sistemas agroflorestais não diferiram da FN.

3.3.3 Origem dos agregados e macrofauna edáfica

Os agregados biogênicos foram a classe morfológica predominante e mostraram diferenças entre os sistemas estudados, com valor superior no CF e FN (em média, 98,20 e 98,59%) e menor nos sistemas agroflorestais (em média 88,46%) (Figura 5). O oposto foi observado para os agregados intermediários, que apresentaram menor valor no CF e na FN (em média, 1,60%) em relação aos SAFs (em média 10,48%). Os agregados

fisiogênicos foram encontrados em maior quantidade no SAF-BMG (1,67%) em comparação aos outros dois SAFs estudados (em média 0,74%) e estiveram ausentes na floresta nativa e no CF (Figura 5).

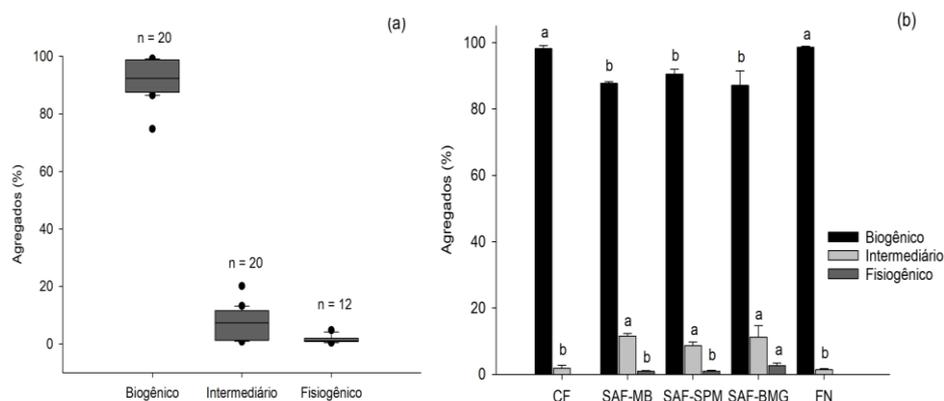


Figura 5 – Proporção das classes morfológicas (%) em quatro sistemas de cultivo de café e em floresta nativa: (a) Comparação entre classes morfológicas e (b) comparação entre sistemas. Em que: CF - consórcio de café com forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM – sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevilea, fruta-pão, cinamomo e mogno; e FN – floresta nativa. Letras iguais nas barras de mesma cor (b) não diferem entre si pelo teste de Fisher a 5% de significância.

Foram identificados 27 grupos taxonômicos nos cinco sistemas avaliados: 14 no CF, 15 no SAF-MB, 18 no SAF-SPM, 17 no SAF-BMG e 14 na FN (Figura 6). Embora a densidade total de indivíduos tenha apresentado diferença de 62,62% entre o valor máximo (824 indivíduos m^{-2} – SAF-SPM) e mínimo (308 indivíduos m^{-2} – CF), não foram verificadas diferenças significativas entre os tratamentos. A alta densidade observada para o SAF-SPM foi influenciada pela expressiva densidade do grupo Formicidae, que representou 41% do total de grupos encontrados nesse tratamento. Os valores de riqueza média mostraram diferenças, sendo maior no SAF-SPM em relação a CM (Figura 6), embora sem diferenciação em relação aos demais sistemas. A riqueza total não mostrou grandes diferenças entre os sistemas estudados. Apesar disso, foi possível observar que o índice de Pielou e índice de diversidade de Shannon mostraram maiores valores no CF e na FN em relação aos SAFs.

Adicionalmente, foram observadas diferenças na abundância dos grupos Araneae e Isopoda, que apresentaram maior densidade no SAF-SPM (Figura 6), embora com diferenciação apenas em relação ao SAF-MB e à FN (para o grupo Araneae) e em relação

ao SAF-BMG para o grupo Isopoda.

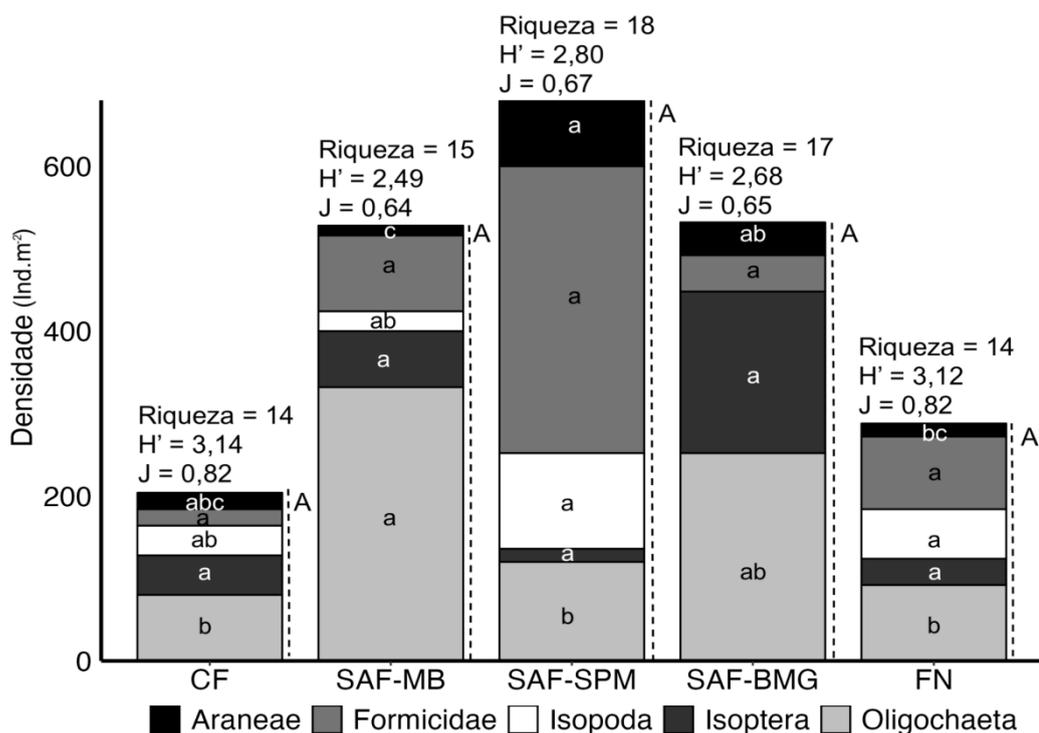


Figura 6 – Grupos predominantes da macrofauna edáfica em quatro sistemas de cultivo de café e em floresta nativa. Em que: CF – consórcio de café com forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM – sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevílea, fruta-pão, cinamomo e mogno; e FN – floresta nativa; H' – Índice de Shannon; J – índice de equitabilidade de Pielou. Letras maiúsculas iguais acima e minúsculas dentro das barras não diferem entre si pelo teste Kruskal Wallis a 5% de significância.

3.3.4 Interação fauna, agregados e carbono

A análise de componentes principais dos atributos do solo (fauna, carbono, agregação), raízes e serapilheira explicou 81,28% da dissimilaridade entre os sistemas avaliados por meio de dois componentes (Figura 7a), com 59,23% correspondendo ao primeiro componente principal (CP1) e 22,5%, ao segundo componente (CP2). O CP1 apresentou associações com a maioria das variáveis, sendo que o carbono lábil do solo não fracionado e de todas as classes de agregados e o carbono total (das classes 6-4 e 4-2 mm) exibiram as maiores cargas fatoriais (Tabela 3), exercendo forte influência positiva ao longo dessa dimensão. As demais variáveis mais preponderantes para a explicação do CP1 foram os grupos da fauna, os agregados, as raízes dos agregados e os agregados

biogênicos. Por sua vez, a projeção do CP2 esteve baseada nas cargas fatoriais das variáveis CT do solo não fracionado e dos agregados <2 mm, riqueza e densidade da macrofauna (Tabela 3).

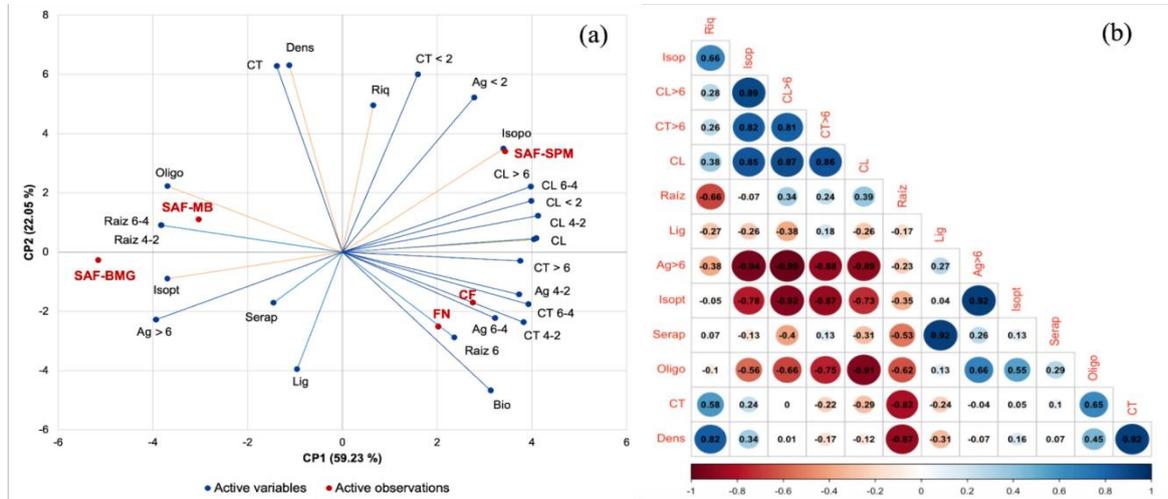


Figura 7 – Diagrama de ordenação produzido pela análise de componentes principais (a) e matriz de correlação de Pearson (b) de atributos do solo (fauna, carbono, agregação), raízes e serapilheira em quatro sistemas de cultivo de café e em floresta nativa. Em que: CF – consórcio de café com forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM – sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevílea, fruta-pão, cinamomo e mogno; FN – floresta nativa; CT – carbono total do solo; CL – carbono lábil do solo; Isop, Isopt e Olig – grupos Isopoda, Isoptera e Oligochaeta; Riq – riqueza; Dens – densidade do solo; Bio – agregados biogênicos; Ag < 6, Ag 6-4, Ag 4-2 e Ag < 2 – proporção das classes de agregados > 6, 6-4, 4-2 e < 2 mm, respectivamente; Serap – serapilheira; Lig – lignina da serapilheira; CT > 6, CT 6-4, CT 4-2 e CT < 2 – carbono total das classes de agregados; CL > 6; CL 6-4, CL 4-2 e CL < 2 – carbono lábil dos agregados; Raiz 6, Raiz 6-4 e Raiz 4-2 mm – raízes das classes dos agregados.

A dispersão gráfica dos sistemas em relação aos eixos sugeriu similaridade entre FN e CF (Figura 7a), que ficaram agrupados no quadrante inferior direito e mais associados com o carbono das classes > 6, 6-4 e 4-2 mm, agregados 6-4 e 4-2 mm, agregados biogênicos e raiz >6 mm. Os demais sistemas ficaram isolados, cada um em um quadrante distinto: SAF-SPM ficou posicionado no quadrante superior direito (mais associado com riqueza média, agregados < 2 mm, grupo Isopoda, carbono lábil do solo e de todas as classes de agregados e CT da classe < 2 mm), SAF-MB ficou no quadrante superior esquerdo (mais relacionado com o grupo Oligochaeta e raízes das classes 6-4 e 4-2 mm) e SAF-BMG ficou no quadrante inferior esquerdo (mais associado com o grupo

Isoptera, agregados > 6 mm, serapilheira e lignina).

Correlações positivas mais fortes foram encontradas entre as variáveis densidade e CT, a qual foi fortemente correlacionada com a riqueza da fauna (Figura 7b). Também houve forte associação positiva entre a serapilheira e a lignina e entre CL e as variáveis CL e CT dos agregados >6 mm e grupo Isopoda. As Oligochaetas se correlacionaram positivamente com os agregados >6 mm e com o grupo Isoptera, o qual foi negativamente correlacionado com o grupo Isopoda, CL e CT dos agregados >6 mm e CL do solo. Outras correlações negativas foram encontradas entre o CT e a massa de raízes, entre a densidade do solo e a massa de raízes e entre a massa de raízes e a riqueza da macrofauna (Figura 7b).

Tabela 3 - Cargas fatoriais das variáveis na análise de componentes principais (ACP) de atributos do solo (fauna, carbono e agregados) e serapilheira em sistemas de cultivo de café e em floresta nativa.

Variáveis	CP1	CP2
Isop	0,80	0,50
Isopt	-0,87	-0,13
Olig	-0,87	0,32
Riq	0,15	0,71
Dens	-0,26	0,91
CT	-0,33	0,90
CL	0,95	0,06
CT > 6	0,89	-0,04
CT 6-4	0,92	-0,25
CT 4-2	0,90	-0,34
CT <2	0,37	0,86
CL > 6	0,94	0,32
CL 6-4	0,94	0,25
CL 4-2	0,97	0,07
CL <2	0,97	0,18

Ag > 6	-0,93	-0,33
Ag 6-4	0,76	-0,32
Ag 4-2	0,88	-0,21
Ag <2	0,66	0,75
Serap	-0,34	-0,25
Raiz > 6	0,56	-0,42
Raiz 6-4	-0,90	0,13
Raiz 4-2	-0,90	0,13
Bio	0,74	-0,67
Lig	-0,23	-0,57

Em que: CP1 – componente 1; CP2 – componente 2; CT – carbono total do solo; CL – carbono lábil do solo; Isop, Isopt e Olig – grupos Isopoda, Isoptera e Oligochaeta; Riq – riqueza; Dens – densidade do solo; Bio – agregados biogênicos; Ag < 6, Ag 6-4, Ag 4-2 e Ag < 2 – proporção das classes de agregados > 6, 6-4, 4-2 e < 2 mm; Serap – serapilheira; Lig – lignina da serapilheira; CT > 6, CT 6-4, CT 4-2 e CT < 2 – carbono total das classes de agregados; CL > 6; CL 6-4, CL 4-2 e CL < 2 – carbono lábil dos agregados; Raiz 6, Raiz 6-4 e Raiz 4-2 mm – raízes das classes dos agregados.

3.4 DISCUSSÃO

3.4.1 Estoques de serapilheira, polifenóis, lignina, celulose, carbono total e lábil do solo

A influência positiva dos sistemas biodiversos de café no estoque de carbono total do solo (Figura 4) refletiu o efeito da presença das árvores, que contribui para o aporte contínuo de resíduos vegetais (por meio da deposição de serapilheira e *turnover* de raízes) e para o estabelecimento de um microclima mais favorável a decomposição (Noordwijk et al., 2002; Philpott e Dietsch, 2003; Häger, 2012; Stein, 2022) e incorporação de matéria orgânica no solo. Essa explicação é corroborada pela maior expressão do estoque de serapilheira foliar verificada nos SAFs de café comparado ao CF, representando mais de 50% da serapilheira total em todos os sistemas estudados. As folhas desempenham um papel crucial na ciclagem de nutrientes e nas entradas de carbono no solo, uma vez que representam maior proporção da fitomassa e nutrientes

fornecidos pela serapilheira (Alves et al., 2017).

Nessa linha, o estoque de carbono total no CF é menos regulado pelo estoque de folhas devido a ausência do componente arbóreo e mais regulado pela presença da espécie forrageira, que caracteriza-se pela presença de grande concentração de raízes em diferentes frações do solo (Tabela 2). Espécies forrageiras como Braquiárias possuem grande capacidade de adição de resíduos abaixo do solo provenientes do *turnover* de raízes e exsudatos radiculares, bem como alta concentração de raízes proteóides (Silva et al., 1997; Kuzyako, 2002). De acordo com os estudos de Matos et al., (2023) e (Tonucci et al., 2023) em sistemas agroflorestais, a presença de gramíneas aumentou o potencial para armazenamento de carbono no solo.

O aumento no estoque de carbono no sistema de cultivo de café SAF-SPM pode estar relacionado à presença da sibipiruna, uma leguminosa da família Fabaceae, que possui forte concentração de nitrogênio presente nos resíduos vegetais (Oliveira et al., 2018). Essa espécie impacta positivamente a transferência de carbono e nitrogênio no solo, influenciando as propriedades químicas do solo, melhorando a disponibilidade de nutrientes e aumentando a atividade microbológica, conforme estudos de Talgre et al. (2017), Isaac e Borden (2019) e Kebede (2021).

O maior teor de polifenóis no SAF-MB em comparação com o CF é resultado da composição diferenciada da serapilheira. Enquanto o SAF-MB apresenta uma combinação de folhas de árvores e de cafeeiro na serapilheira, o CF consiste basicamente do cafeeiro. Adicionalmente, o componente outros da serapilheira, o qual é composto predominantemente por cascas e galhos, é mais abundante no SAF-MB, influenciando os polifenóis devido à resistência desses materiais à decomposição. Por outro lado, se verificarmos a FN, que contém uma quantidade significativamente maior desses componentes, observa-se uma diferenciação especialmente em relação à lignina. Isso sugere que as discrepâncias na quantidade do componente outros do SAF-MB podem não ter sido suficientes para diferenciar os compostos orgânicos, mas a quantidade de folhas de árvores desempenhou um papel relevante nessa distinção. Monteiro e Gama-Rodrigues (2004) avaliaram o efeito da qualidade nutricional e orgânica da serapilheira e observaram que o teor de carbono e polifenóis foram maiores nas folhas que nas outras estruturas analisadas.

3.4.2 Agregados, raízes e carbono

A predominância da classe > 6 mm, representando mais de 40% dos agregados na maioria dos sistemas, sugere uma presença significativa de agregados maiores e menos fragmentados (Tabela 2). A manutenção de grandes macroagregados no solo é caracterizada por dois mecanismos principais. De um lado, a presença de matéria orgânica mais resistente à decomposição, como raízes finas e outros resíduos vegetais contribuem para a formação desses agregados (Spohn e Giani, 2011), conforme observado na predominância das raízes na classe > 6 mm (Tabela 2). Do outro lado, a regulação dos ciclos de umedecimento e secagem do solo, promovido pelo menor gradiente de umidade na presença de maior cobertura do solo, diminuem o *turnover* de macroagregados (Six et al., 2002) e a fragmentação em frações menores.

A regulação dos ciclos de umedecimento e secagem pela maior cobertura do solo (Figura 1) ocorreu em maior magnitude nos SAF-MB (56,33% de >6 mm) e SAF-BMG (76,03% de >6 mm) e em menor magnitude no SAF-SPM (22,87% de >6 mm) devido a menor cobertura entre os SAFs. A quebra de agregados >6 mm levou ao aumento de < 2 mm, em função da diminuição da cobertura do solo e da maior influência da matéria orgânica, como evidenciado no SAF-SPM. A cobertura vegetal, que impede ou reduz a ação direta das gotas de chuva e mantém umidade e temperatura mais uniformes, favore o desenvolvimento do sistema radicular e ajuda a criar um ambiente mais favorável para a agregação do solo (Campos et al., 1999; Nunes et al., 2010).

A participação intermediária da classe < 2 mm pode ser justificada pela sua característica de formação, a qual se diferencia de macroagregados de maior tamanho. Agregados nessa faixa de tamanho são formados por matéria orgânica como agente ligante – dependendo de elementos como cargas de argila, colóides, íons e matéria orgânica persistente (Bougma et al., 2022) –, por ação mecânica do crescimento radicular ou por enovelamento realizado por hifas de fungos (Bastos et al., 2005). Esses seus mecanismos aumentam a estabilidade dos agregados, tornando-os menos suscetíveis a perturbações físicas (Tisdall e Oades, J. M., 1982; Ouattara et al., 2008). É provável que alterações nessa classe de agregados sejam sensíveis apenas em grandes variações de manejo do solo, principalmente entre sistemas de uso da terra que utilizam o preparo de solo com revolvimento. Cultivos de café, com ou sem árvores, são sistemas perenes que utilizam o preparo do solo apenas durante o período de implantação do sistema, mantendo a estabilidade física do solo por vários anos.

A redução nos teores de carbono nas classes de agregados nos sistemas de cultivo

de café SAF-MB e SAF-BMG pode ser atribuída à entrada de resíduos orgânicos, influenciando o processo de decomposição (Tabela 2). Esses sistemas apresentaram menores níveis de estoque de nitrogênio nos agregados, carbono lábil e uma menor massa de raízes (Tabela 2), indicando uma possível limitação na disponibilidade de material orgânico para contribuir no estoque de carbono dos agregados, especialmente nas frações >6 e 4-2 mm desses sistemas. Adicionalmente, a presença de cedro na composição do sistema SAF-BMG, com resíduos reconhecidos por sua riqueza em compostos fenólicos (Tandon e Sand, 2016), contribui para uma baixa taxa de decomposição (Kaushal et al., 2005), resultando assim em uma menor incorporação de carbono no solo.

Embora, os teores de lignina e polifenóis tenham se mantido constantes entre os SAFs de café, o SAF-SPM apresentou menores teores de celulose, juntamente com os altos teores de nitrogênio no solo em diferentes frações (Figura 4 e Tabela 2). Essas características podem ter aumentado o potencial de estoque de carbono no solo devido a menor resistência à transformação do resíduo vegetal, que levou a uma maior incorporação do carbono. Adicionalmente, o manejo orgânico empregado nessas áreas pode ter contribuído para o aumento dos estoques de carbono orgânico do solo. Nesse sentido, algumas pesquisas mostram a importância do manejo orgânico para o estoque de carbono (Freibauer et al., 2004; Lynch et al., 2011; Scialabba e Müller-Lindenlauf, 2010; Tumwebaze e Byakagaba, 2016; Notaro et al., 2014).

A presença da sibipiruna, pertencente à família Fabaceae (leguminosa), aumentou o teor de carbono lábil (Tabela 2) no sistema SAF-SPM por apresentar em sua composição resíduos de elevada taxa de decomposição, resultante da baixa relação C/N (Canalli et al., 2020). Por outro lado, os valores elevados do CL no CF são associados a presença das gramíneas, que possuem um sistema radicular abundante (Tabela 2). Desta forma, a árvore em questão contribui de forma expressiva para o aumento dos teores de carbono lábil, por aumentar a produção de exsudatos radiculares, e a atividade microbiana.

3.4.3 Origem dos agregados e macrofauna edáfica

A superioridade de agregados biogênicos em comparação aos intermediários e fisiogênicos dá-se pela composição da vegetação dos sistemas analisados (Figura 5), que contribui para um aporte contínuo de material formador de serapilheira e de raízes (Schultz et al., 2019). Além disso, o menor gradiente de umidade do solo diminui a

variação nos ciclos de secagem e umedecimento do solo, desfavorecendo o processo de formação dos agregados fisiogênicos (Brady e Weil, 2013).

A predominância de agregados biogênicos no sistema de cultivo de café CF é atribuída à ação benéfica do sistema radicular das gramíneas. A presença de sistemas radiculares densos, em conjunto com a renovação constante dessas raízes, propicia um aumento na introdução de matéria orgânica no solo, o que estimula a formação de agregados biogênicos (Pulleman et al., 2005; Pinto et al., 2021). Essa dinâmica também foi corroborada por Schultz et al. (2019), tanto em ambientes florestais quanto em áreas com presença de gramíneas. De acordo com esses autores, agregados biogênicos possuem papel importante na melhoria das características físicas do solo. O efeito das raízes e fauna do solo sobre a formação de agregados biogênicos aumenta a porosidade do solo como um todo, uma vez que eles possuem mais macroporos do que os agregados fisiogênicos (Melo et al., 2019), o que contribui para a diminuição da compactação do solo (Ferreira et al., 2020). Isso (a menor presença de agregados biogênicos) justifica o porquê dos maiores valores de densidade do solo no SAFs comparativamente ao CF e FN (Tabela 1).

No presente estudo, apesar de não apresentar diferença entre os sistemas, o grupo Formicidae apresentou grande abundância no SAFs (Figura 6). As formigas são um dos grupos mais importantes em sistemas tropicais, por sua alta diversidade e abundância (Scoriza e Correia, 2016; Chamorro-Martínez et al., 2022). O plantio de espécies arbóreas juntamente com as espécies agrícolas proporciona maior diversidade de estratos verticais, aumentando a riqueza de espécies de formigas no cafezal (Amaral et al., 2019).

O grupo das Oligochaetas é um dos mais importantes grupos da macrofauna, em virtude de serem considerados engenheiros do ecossistema, tendo influência nas propriedades físicas do solo. As Oligochaetas também são conhecidas por prestar diversos serviços ambientais, como a ciclagem de nutrientes, decomposição da matéria orgânica e melhoria de atributos como agregação, porosidade e infiltração de água (Baretta et al., 2011; Brown et al., 2018; Lavelle et al., 2006). Sua presença constante em todos os sistemas de cultivo de café (Figura 6) favoreceu a formação de agregados >6 mm, corroborando assim a superioridade desses agregados nos sistemas de cultivos de café analisados (Figura 6).

O grupo das Araneae é influenciado por fatores como a composição e a estrutura da vegetação, os quais podem afetar tanto a abundância quanto a diversidade da fauna

(Oxbrough et al., 2007; Benati et al., 2010). Em ambientes como sistemas agroflorestais diversificados, essa influência pode desencadear uma variedade de micro-habitats caracterizados por diferentes tipos de vegetação, estruturas do dossel, substratos do solo e níveis de sombreamento. Consequentemente, essa diversidade de micro-habitats pode proporcionar uma maior disponibilidade de nichos alimentares para o grupo Araneae, ampliando suas oportunidades de acesso a recursos alimentares variados.

A presença dos Isopteras em todos os sistemas avaliados também explica a maior quantidade de (Figura 5) agregados biogênicos. Ademais, os estudos de Velasquez et al. (2007, 2012) corroboram esse papel, evidenciando um aumento no acúmulo de agregados biogênicos e destacando a relevância dos principais engenheiros do ecossistema do solo, como Isoptera e Oligochaeta. Os Isoptera, reconhecidos por sua notável habilidade em concentrar nutrientes em seus ninhos (Silva e Mendonça, 2007), desempenham um papel crucial na ciclagem de diversos elementos, entre eles N (nitrogênio), P (fósforo), K (potássio), S (enxofre), Ca (cálcio), Na (sódio), C (carbono) e O (oxigênio). Em particular, os ciclos de C e N são os mais acentuados (Lee e Wood, 1971). Determinadas espécies desse grupo têm o hábito de coletar partículas de diferentes profundidades do solo, depositando-as em montículos enriquecidos com C orgânico e nutrientes em comparação com os solos circundantes (Brussaard et al., 2007).

Valores mais baixos de diversidade (H') refletem uma maior prevalência de certos grupos em detrimento de outros, como discutido por Begon et al. (2006). Houve predomínio dos grupos Formicidae, Isoptera e Oligochaeta. Por outro lado, o índice de equitabilidade de Pielou foi maior no CF e na FN, indicando uma distribuição mais equilibrada das abundâncias dos táxons nesses últimos sistemas. De um lado, a diversidade de espécies de flora na FN cria nichos ecológicos diversos que promovem abrigo, alimento e condições de solo adequadas ao desenvolvimento diversificado de diferentes espécies da fauna, garantindo o equilíbrio entre as populações. Do outro lado, a cobertura do solo, propiciada pela presença de *Brachiaria spp.* nas entrelinhas de plantio, criou um ambiente propício para a distribuição mais equitativa das populações de fauna do solo, assim como também proporciona um abrigo para organismos com diferentes estratégias de sobrevivência (Kitamura et al., 2020).

3.4.4 Interação fauna, agregados e carbono

A associação do CF com a FN são direcionados principalmente pelos agregados biogênicos, que foram mais influenciados pelas raízes e carbono total e lábil presentes nos agregados e menos influenciados pela ação da fauna do solo. Por outro lado, a fauna do solo, em particular as Oligochaetas e Isopteras tiveram forte associação com agregados >6 mm, o que sugere uma influência da fauna sobre a formação de agregados dessa classe, mas não foram os principais responsáveis pela formação de agregados biogênicos.

SAF-SPM ficou posicionado no quadrante superior direito e com associação com os sistemas CF e FN, no entanto direcionado pelo CL dos agregados e o grupo dos Isopodas – o que sugere maior adição de resíduos mais facilmente decomponíveis provenientes da leguminosa presente nesse sistema. O aumento da labilidade dos resíduos vegetais nesse sistema pode ter aumentado a disponibilidade de alimento para a fauna, o que explica a associação com a riqueza média. No entanto, essa associação deve ser entendida com cautela, por causa da baixa correlação entre Isopodas e riqueza com o CL <6, CL 6-4, CL 4-2 e CL <2 mm (Figura 7b). Embora seja conhecido que a fauna possui ação direta na fragmentação de resíduos vegetais (Silva et al., 2016), pouco se sabe sobre a influência deste mecanismo sob a qualidade dos resíduos vegetais associados aos macroagregados. Por outro lado é importante reportar ao significativo papel do grupo Isopoda sob a transformação da matéria orgânica, este promove a decomposição microbiana e, conseqüentemente, a liberação de carbono e nutrientes para a solução do solo (Paoletti e Hassall, 1999).

A posição do SAF-MB no quadrante superior esquerdo, mais relacionado com o grupo Oligochaeta, raízes das classes 6-4 e 4-2 mm, sugere uma estreita conexão com a atividade radicular e a presença de minhocas, as quais desempenham um papel essencial na formação de bioporos (Wendel et al., 2022), especialmente em solos argilosos, onde esses bioporos predominam como macroporos, facilitando o desenvolvimento radicular (Brady e Weil, 2013). Como resultado dessa atividade, as raízes das plantas, ao crescerem e se decomporem, exercem uma influência direta nos níveis de carbono total do solo, liberando exsudatos ricos em compostos orgânicos. Consecutivamente, isso sugere que de forma indireta, a ação da fauna e das raízes diminuiu a densidade do solo pelo efeito do aumento do carbono do solo.

As associações entre as variáveis observadas no SAF-MB também ajudam a explicar a aproximação com o SAF-BMG. As associações, em maior grau, entre o grupo Isoptera e agregados > 6 mm e, em menor grau, entre a serapilheira e lignina, indicam a

contribuição significativa dos Isopteras na formação de agregados >6 mm, pois eles são considerados engenheiros do solo (Jouquet et al., 2006), também chamados de reorganizadores de agregados do solo (Dangerfield et al., 1998; Jouquet et al., 2011; Bottinelli et al., 2015). Os cupins, por exemplo, criam galerias, constroem estruturas orgânicas-minerais com propriedades físicas, químicas e biológicas específicas do solo, e modificam as propriedades mineralógicas das argilas em algumas circunstâncias (Jouquet et al., 2007).

3.5 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo apoiam a hipótese de que sistemas agroflorestais com maior diversidade de espécies favorecem as entradas de resíduos vegetais, aumentando a abundância da fauna, formação de agregados biogênicos e estoque de carbono, tornando-os semelhantes à floresta nativa. Por outro lado, o consórcio de café com gramínea forrageira tem impactos positivos na diversidade da fauna e formação de agregados > 6 mm pela maior influência das raízes.

A composição do sistema interfere na distribuição das classes de agregados. A maior diversidade de espécies no sistema SAF-BMG favoreceu a formação de agregados de maior tamanho (>6 mm), provavelmente pela ação de *Oligochaetas* e *Isopteras*. Por sua vez, o SAF-SPM mostra-se mais favorável à formação de agregados <2 mm e à manutenção das frações lábeis da matéria orgânica do solo devido à presença da *sibipiruna*.

3.6 REFERÊNCIAS

- ADDINSOFT, 2019. XLSTAT statistical and data analysis solution. Version 19.2.2.
- Alves, A.R., Ferreira, R.L.C., Da Silva, J.A.A., Dubeux Júnior, J.C.B., Salami, G., 2017. Nutrientes na biomassa aérea e na serapilheira em áreas de caatinga em Floresta, PE | Pesquisa Florestal Brasileira.
- Amaral, G.C. do, Vargas, A.B. de, Almeida, F.S., 2019. Efeitos de atributos ambientais na biodiversidade de formigas sob diferentes usos do solo. *Ciência Florestal* 29, 660–672. <https://doi.org/10.5902/1980509833811>.
- Anderson, J.M., Ingram, J., 1996. *Tropical Soil Biology and Fertility: A Hand Book of Methods*. XF2006286592.
- Anderson, J.M., Ingram, J.S.I., 1993. *Review of Tropical Soil Biology and Fertility: A*

Handbook of Methods. Journal of Ecology 78, 547–548.
<https://doi.org/10.2307/2261129>.

Aziz, S.A., Karim, S.M., 2016. The Effect of Some Soil Physical and Chemical Properties on Soil Aggregate Stability in Different Locations in Sulaimani and Halabja Governorate. OJSS 06, 81–88. <https://doi.org/10.4236/ojss.2016.64009>.

Baretta, D., Santos, J., Segat, J., Geremia, E.V., Oliveira Filho, L.C., Alves, M., 2011. Fauna edáfica e qualidade do solo. pp. 119–170.

Barreto-Garcia, P.A.B., Gomes Monteiro Batista, S., Forestieri da Gama-Rodrigues, E., de Paula, A., Charles Amaral Batista, W., 2021. Short-term effects of forest management on soil microbial biomass and activity in caatinga dry forest, Brazil. Forest Ecology and Management 481, 118790. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118790>.

Bastos, R.S., Mendonça, E. de S., Alvarez V., V.H., Corrêa, M.M., Costa, L.M. da, 2005. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. Rev. Bras. Ciênc. Solo 29, 21–31. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000100003>.

Bastos, T.R. dos S., Anjos Bittencourt Barreto-Garcia, P., de Carvalho Mendes, I., Henrique Marques Monroe, P., Ferreira de Carvalho, F., 2023. Response of soil microbial biomass and enzyme activity in coffee-based agroforestry systems in a high-altitude tropical climate region of Brazil. CATENA 230, 107270. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107270>.

Batista, I., Correia, M.E.F., Pereira, M.G., Bieluczyk, W., Schiavo, J.A., Mello, N.A.D., 2013. Caracterização dos agregados em solos sob cultivo no cerrado, MS. Sem. Ci. Agr. 34, 1535–1548. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n4p1535>.

Benati, K., Peres, M., Tinôco, M., Brescovit, A., 2010. Influência da estrutura de hábitat sobre aranhas (Araneae) de serrapilheira em dois pequenos fragmentos de mata atlântica. Neotropical Biology and Conservation. 5, 39–46. <https://doi.org/10.4013/nbc.2010.51.06>.

Blair, G.J., Lefroy, R.D.B., Lisle, L., 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. Aust. J. Agric. Res., 46, 1459–1466. <https://doi.org/10.1071/ar9951459>.

Bote, A.D., Struik, P.C., 2011. Effects of shade on growth, production and quality of coffee (*Coffea arabica*) in Ethiopia.

Bottinelli, N., Jouquet, P., Capowiez, Y., Podwojewski, P., Grimaldi, M., Peng, X., 2015. Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? Soil and Tillage Research, Soil Structure and its Functions in Ecosystems: Phase matter & Scale matter 146, 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.007>.

Bougma, A.B., Ouattara, K., Compaore, H., Nacro, H.B., Melenya, C., Mesele, S.A., Logah, V., Azeez, J.O., Veenendaal, E., Lloyd, J., 2022. Soil aggregate stability of forest islands and adjacent ecosystems in West Africa. Plant and Soil. 473, 533–546. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05302-x>.

- Brady, N., Weil, R.R., 2013. Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos, 3rd ed. Bookman.
- Bronick, C.J., Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*. 124, 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>.
- Brown, G.G., Da Silva, E., Thomazini, J.M., Brazil, E.F., Niva, C.C., Brazil, E.C., 2018. The role of soil fauna in soil health and delivery of ecosystem services.
- Brussaard, L., Pulleman, M.M., Ouédraogo, É., Mando, A., Six, J., 2007. Soil fauna and soil function in the fabric of the food web. *Pedobiologia*. 50, 447–462. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2006.10.007>.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T., 1985. Handbook for soil thin section description.
- Campos, B.C., Reinert, D.J., Nicolodi, R., Cassol, L.C., 1999. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 23, 383–391. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000200021>.
- Canalli, L.B. dos S., Santos, J.B. dos, Silva, A.A. e, Muchinski, A., Feliciano, E., Penteadó, D., 2020. Residues Decomposition in Crop Rotations under No-till System. *Braz. arch. biol. technol.* 63, e20190609. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-solo-2020190609>.
- Chamorro-Martínez, Y., Torregroza-Espinosa, A.C., Pallares, M.I.M., Osorio, D.P., Paternina, A.C., Echeverría-González, A., 2022. Soil macrofauna, mesofauna and microfauna and their relationship with soil quality in agricultural areas in northern Colombia: ecological implications. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 46, e0210132. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210132>.
- Chellappa, J., Sagar, K.L., Sekaran, U., Kumar, S., Sharma, P., 2021. Soil organic carbon, aggregate stability and biochemical activity under tilled and no-tilled agroecosystems. *Journal of Agriculture and Food Research*. 4, 100139. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100139>.
- Conab, 2023. Conab - Boletim da Safra de Café. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe> (accessed 2.13.24).
- Dangerfield, J.M., Mccarthy, T.S., Ellery, W.N., 1998. The mound-building termite *Macrotermes michaelseni* as an ecosystem engineer. *Journal of Tropical Ecology*. 14, 507–520. <https://doi.org/10.1017/S0266467498000364>.
- Dieckow, J., Bayer, C., Martin-Neto, L., Mielniczuk, J., 2004. Sistemas Conservacionistas de Preparo do Solo e Implicações no Ciclo do Carbono. - Portal Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/30484/sistemas-conservacionistas-de-preparo-do-solo-e-implicacoes-no-ciclo-do-carbono> (accessed 2.13.24).
- Dindal, L., 1990. Soil Biology Guide.

Du, X., Jian, J., Du, C., Stewart, R.D., 2022. Conservation management decreases surface runoff and soil erosion. *International Soil and Water Conservation Research*. 10, 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.08.001>.

Ellert, B.H., Bettany, J.R., 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil. Sci.* 75, 529–538. <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>.

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., 2022. Agroforestry Systems for Soil Health Improvement and Maintenance. *Sustainability*. 14, 14877. <https://doi.org/10.3390/su142214877>.

Ferreira, C. dos R., Silva Neto, E.C. da, Pereira, M.G., Guedes, J. do N., Rosset, J.S., Anjos, L.H.C. dos, 2020. Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. *Soil and Tillage Research*. 198, 104533. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104533>.

Fontana, A., Brito, R.J. de, Pereira, M.G., Loss, A., 2010. Índices de agregação e a relação com as substâncias húmicas em Latossolos e Argissolos de tabuleiros costeiros, Campos dos Goytacazes, RJ. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*. 5, 291–297. <https://doi.org/10.5039/agraria.v5i3a461>.

Francaviglia, R., Renzi, G., Ledda, L., Benedetti, A., 2017. Organic carbon pools and soil biological fertility are affected by land use intensity in Mediterranean ecosystems of Sardinia, Italy. *Sci Total Environ*. 599–600, 789–796. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.021>.

Freibauer, A., Rounsevell, M.D.A., Smith, P., Verhagen, J., 2004. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma*. 122, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.021>.

Häger, A., 2012. The effects of management and plant diversity on carbon storage in coffee agroforestry systems in Costa Rica | *Agroforestry Systems*. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9545-1>.

Insfrán Ortiz, A., Rey Benayas, J.M., Cayuela Delgado, L., 2023. Agroforestry improves soil fauna abundance and composition in the Atlantic Forest of Paraguay. *Agroforest Syst* 97, 1447–1463. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00869-5>.

Isaac, M.E., Borden, K.A., 2019. Nutrient acquisition strategies in agroforestry systems. *Plant Soil*. 444, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04232-5>.

Jouquet, P., Dauber, J., Lagerlöf, J., Lavelle, P., Lepage, M., 2006. Soil invertebrates as ecosystem engineers: Intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Applied Soil Ecology*. 32, 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.07.004>.

Jouquet, P., Mathieu, J., Barot, S., Choosai, C., 2007. Soil engineers as ecosystem heterogeneity drivers. *Ecology Research Progress*.

Jouquet, P., Traoré, S., Choosai, C., Hartmann, C., Bignell, D., 2011. Influence of termites

on ecosystem functioning. Ecosystem services provided by termites. *European Journal of Soil Biology*, 47, 215–222. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.05.005>.

Kaushal, R., Verma, K.S., Singh, K.N., 2005. Seasonal Dynamics and Role of Substrate Quality in Leaf Litter Decomposition of Different Agro forestry Tree Species. *Indian Journal of Agroforestry*. 7.

Kemper, W.D., Rosenau, R.C., 1986. Aggregate Stability and Size Distribution.

Kitamura, A.E., Tavares, R.L.M., Alves, M.C., Souza, Z.M. de, Siqueira, D.S., 2020. Soil macrofauna as bioindicator of the recovery of degraded Cerrado soil. *Cienc. Rural*. 50, e20190606. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190606>.

Kuzyako, Y., 2002. Review: Factors affecting rhizosphere priming effects. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200208\)165:4%3C382::AID-JPLN382%3E3.0.CO;2-%23](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200208)165:4%3C382::AID-JPLN382%3E3.0.CO;2-%23).

Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., Rossi, J.-P., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, ICSZ 42, S3–S15. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.10.002>.

Lee, K.E., Wood, T.G., 1971. *Termites and Soils* By K. E. Lee and T. G. Wood London: Academic Press (1971), pp. 251, £4. *Experimental Agriculture*. 8, 281–281. <https://doi.org/10.1017/S0014479700005354>.

Loss, A., Ferreira, G.W., Comin, J.J., Pereira, M.G., Freo, V.A., De Cássia Piccolo, M., Brunetto, G., 2020. Carbono orgânico total e oxidável em agregados de um argissolo adubado com dejetos suínos. *Ciencia del suelo*. 38, 12–20.

Lynch, D.H., MacRae, R., Martin, R.C., 2011. The Carbon and Global Warming Potential Impacts of Organic Farming: Does It Have a Significant Role in an Energy Constrained World? *Sustainability* 3, 322–362. <https://doi.org/10.3390/su3020322>.

Marsden, C., Martin-Chave, A., Cortet, J., Hedde, M., Capowiez, Y., 2020. How agroforestry systems influence soil fauna and their functions - a review. *Plant Soil* 453, 29–44. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04322-4>.

Matos, P.S., Fonte, S.J., Lima, S.S., Pereira, M.G., Kelly, C., Damian, J.M., Fontes, M.A., Chaer, G.M., Brasil, F.C., Zonta, E., 2020. Linkages among Soil Properties and Litter Quality in Agroforestry Systems of Southeastern Brazil. *Sustainability* 12, 9752. <https://doi.org/10.3390/su12229752>.

Melo, T.R. de, Pereira, M.G., Cesare Barbosa, G.M. de, Silva Neto, E.C. da, Andrello, A.C., Filho, J.T., 2019. Biogenic aggregation intensifies soil improvement caused by manures. *Soil and Tillage Research* 190, 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.017>.

Meurer, K., Barron, J., Chenu, C., Coucheney, E., Fielding, M., Hallett, P., Herrmann, A.M., Keller, T., Koestel, J., Larsbo, M., Lewan, E., Or, D., Parsons, D., Parvin, N., Taylor, A., Vereecken, H., Jarvis, N., 2020. A framework for modelling soil structure dynamics induced by biological activity. *Global Change Biology* 26, 5382–5403. <https://doi.org/10.1111/gcb.15289>.

Monteiro, M.T., Gama-Rodrigues, E.F., 2004. Carbono, nitrogênio e atividade da biomassa microbiana em diferentes estruturas de serapilheira de uma floresta natural. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 28, 819–826. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000500004>.

Nascimento, M. dos S., Anjos Bittencourt Barreto-Garcia, P., Henrique Marques Monroe, P., Nogueira Scoriza, R., de Souza Gomes, V., 2021. Interaction between edaphic mesofauna and organic carbon within water-stable aggregates in forestry systems: A case study in northeastern Brazil. *CATENA* 202, 105269. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105269>.

Nascimento, M.D.S., 2021. Dissertação - Carbono em agregados e macrofauna do solo em sistemas de cultivo de café no sudoeste da Bahia. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.

Noordwijk, M., Rahayu, S., Hairiah, K., Wulan, Y.C., Farida, A., Verbist, B., 2002. Carbon stock assessment for a forest-to-coffee conversion landscape in Sumber-Jaya (Lampung, Indonesia): from allometric equations to land use change analysis. *Science in China Series C-Life Sciences*.

Notaro, K. de A., Medeiros, E.V. de, Duda, G.P., Silva, A.O., Moura, P.M. de, 2014. Agroforestry systems, nutrients in litter and microbial activity in soils cultivated with coffee at high altitude. *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)* 71, 87–95. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162014000200001>.

Nunes, L.A.P.L., Dias, I.J.L.E., Barros, N.F., 2010. Atributos físicos do solo em área de monocultivo de cafeeiro na zona da mata de Minas Gerais = Soil physical attributes in area of monoculture of coffee in the zone of the bush of Minas Gerais. *Bioscience Journal*.

Oliveira, F.R.A. de, Souza, H.A. de, Carvalho, M.A.R. de, Costa, M.C.G., 2018. Green fertilization with residues of leguminous trees for cultivating maize in degraded soil. *Rev. Caatinga* 31, 798–807. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n401rc>.

Oliveira, M.F., Barreto-Garcia, P.A.B., da Conceição Júnior, V., Monroe, P.H.M., Gomes, V. de S., Sousa, J.P., 2022. Changes in microbial biomass and activity of tropical soil submitted to successive *Eucalyptus* rotations in the semi-arid region of Brazil. *Geoderma Regional* 29, e00492. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00492>.

Ouattara, K., Ouattara, B., Nyberg, G., Sédogo, M.P., Malmer, A., 2008. Effects of ploughing frequency and compost on soil aggregate stability in a cotton–maize (*Gossypium hirsutum*-*Zea mays*) rotation in Burkina Faso. *Soil Use and Management* 24, 19–28. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00129.x>.

Oxbrough, A., Gittings, T., O'Halloran, J., Giller, P.S., Kelly, T.C., 2007. Biodiversity of the ground-dwelling spider fauna of afforestation habitats. *Agriculture Ecosystems & Environment* 120, 433–441. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.11.005>.

Paoletti, M.G., Hassall, M., 1999. Woodlice (Isopoda: Oniscidea): their potential for assessing sustainability and use as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 74, 157–165. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00035-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00035-3).

Parron, L.M., Garcia, J.R., de Oliveira, E.B., Brown, G.G., Prado, R.B., 2015. Serviços

Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica.

Peng, X., Horn, R., Hallett, P., 2015. Soil structure and its functions in ecosystems: Phase matter & scale matter. *Soil and Tillage Research, Soil Structure and its Functions in Ecosystems: Phase matter & Scale matter* 146, 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.017>.

Philpott, S.M., Dietsch, T.V., 2003. Coffee and conservation: a global context and farmer involvement.

Pinto, L.A. da S.R., Ziviani, M.M., Morais, I. de S., Ferreira, R., Junior, W.F. da S., Lima, S.S. de, Silva, C.F. da, Torres, J.L.R., Pereira, M.G., 2021. Soil organic matter of aggregates physicogenic and biogenic in areas under no-tillage system in the Cerrado, Brazil. *Research, Society and Development* 10, e39910515012–e39910515012. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i5.15012>.

Pulleman, M.M., Six, J., Van Breemen, N., Jongmans, A., 2005. Soil organic matter distribution and microaggregate characteristics as affected by agricultural management and earthworm activity. *European Journal of Soil Science*. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00696.x>.

R Core Team, 2020. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing.

Ricci, M. dos S.F., Araújo, M. do C.F., Franch, C.M. de C., 2004. Cultivo do Café Orgânico. Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ.

Rondon, T., Hernandez, R.M., Guzman, M., 2021. Soil organic carbon, physical fractions of the macro-organic matter, and soil stability relationship in lacustrine soils under banana crop. *PLOS ONE* 16, e0254121. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254121>.

Santos, H.G. dos, 2018. Sistema brasileiro de classificação de solos, 5ª edição revista e ampliada. ed. Embrapa, Brasília, DF.

Schultz, N., Pinto, L.A.D.S., Santana de Lima, S., Ziviani, M., Assunção, S., Pereira, M., 2019. Agregação do solo e atributos químicos em áreas com diferentes coberturas vegetais. pp. 1–12. <https://doi.org/10.22533/at.ed.1781917101>.

Scialabba, N.E.-H., Müller-Lindenlauf, M., 2010. Organic agriculture and climate change. *Renewable Agriculture and Food Systems* 25, 158–169.

Scoriza, R.N., Correia, M.E.F., 2016. Fauna do Solo como Indicadora em Fragmentos Florestais na Encosta de Morrotes. *Floresta Ambient.* 23, 598–601. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.135715>.

Shang, C., Tiessen, H., 1997. Organic matter lability in A tropical oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density, and magnetic fractionations: *Soil Science* 162, 795–807. <https://doi.org/10.1097/00010694-199711000-00004>.

Silva, M.S.C. da, Correia, M.E.F., Silva, E.M.R. da, Maddock, J.E.L., Pereira, M.G., Silva, C.F. da, 2016. Soil Fauna Communities and Soil Attributes in the Agroforests of

Paraty. *Floresta Ambient.* 23, 180–190. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.059813>.

Silva, I., Mendonça, E., 2007. Matéria orgânica do solo. In: Novais, R.F.; Alvarez V., V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B. & Neves, J.C.L., *Fertilidade do Solo*.

Silva, I.F., Mielniczuk, J., Silva-Zolezzi, I., 1997. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. *Environmental Science, Agricultural and Food Sciences*.

Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Deneff, K., 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research, Advances in Soil Structure Research* 79, 7–31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>.

Six, J., Conant, R.T., Paul, E.A., Paustian, K., 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241, 155–176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>.

Soil Survey Staff, 2014. *Keys to Soil Taxonomy* | Natural Resources Conservation Service. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.

Spohn, M., Giani, L., 2011. Impacts of land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time. *Soil Biology and Biochemistry* 43, 1081–1088. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.01.029>.

Staver, C., Guharay, F., Monterroso, D., Muschler, R.G., 2001. Designing pest-suppressive multistrata perennial crop systems: shade-grown coffee in Central America. *Agroforestry Systems* 53, 151–170. <https://doi.org/10.1023/A:1013372403359>.

Stein, T., 2022. Carbon dioxide now more than 50% higher than pre-industrial levels | National Oceanic and Atmospheric Administration. URL <https://www.noaa.gov/news-release/carbon-dioxide-now-more-than-50-higher-than-pre-industrial-levels>.

Sun, X., Xing, Y., Yan, G., Liu, G., Wang, X., Wang, Q., 2024. Dynamics of glomalin-related soil protein and soil aggregates during secondary succession in the temperate forest. *CATENA* 234, 107602. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107602>.

Talgre, L., Roostalu, H., Maeorg, E., Lauringson, E., 2017. Nitrogen and carbon release during decomposition of roots and shoots of leguminous green manure crops. *Agronomy Research*. URL <https://orgprints.org/id/eprint/35242>.

Tandon, S., Sand, N., 2016. Qualitative Analysis of Phenolic Constituents from Leaves of Some Plants of Family Meliaceae. *International Journal of Medicinal Plants and Natural Products* 2. <https://doi.org/10.20431/2454-7999.0201005>.

Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A.F., Teixeira, W.G., 2017. Manual de métodos de análise de solo. - Portal Embrapa. URL <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>.

Tisdall, J.M., Oades, J. M., 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils - TISDALL - 1982 - *Journal of Soil Science* - Wiley Online Library.

- Tonucci, R.G., Vogado, R.F., Silva, R.D., Pompeu, R.C.F.F., Oda-Souza, M., Souza, H.A. de, 2023. Agroforestry system improves soil carbon and nitrogen stocks in depth after land-use changes in the Brazilian semi-arid region. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 47, e0220124. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20220124>.
- Tumwebaze, S.B., Byakagaba, P., 2016. Soil organic carbon stocks under coffee agroforestry systems and coffee monoculture in Uganda. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 216, 188–193. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.037>.
- Velásquez, E., Fonte, S.J., Barot, S., Grimaldi, M., Desjardins, T., Lavelle, P., 2012. Soil macrofauna-mediated impacts of plant species composition on soil functioning in Amazonian pastures. *Applied Soil Ecology* 56, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.01.008>.
- Velasquez, E., Pelosi, C., Brunet, D., Grimaldi, M., Martins, M., Rendeiro, A.C., Barrios, E., Lavelle, P., 2007. This ped is my ped: Visual separation and near infrared spectra allow determination of the origins of soil macroaggregates. *Pedobiologia* 51, 75–87. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2007.01.002>.
- Wei, T., Simko, V., 2020. R package “corrplot”: Visualization of a Correlation. URL <https://cran.r-project.org/web/packages/corrplot/citation.html> (accessed 2.13.24).
- Wendel, A.S., Bauke, S.L., Amelung, W., Knief, C., 2022. Root-rhizosphere-soil interactions in biopores. *Plant Soil* 475, 253–277. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05406-4>.
- Yan, Z., Zhou, J., Liu, C., Jia, R., Mganga, K.Z., Yang, L., Yang, Y., Peixoto, L., Zang, H., Zeng, Z., 2023. Legume-based crop diversification reinforces soil health and carbon storage driven by microbial biomass and aggregates. *Soil and Tillage Research* 234, 105848. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105848>.
- Yang, C., Li, J., Zhang, Y., 2019. Soil aggregates indirectly influence litter carbon storage and release through soil pH in the highly alkaline soils of north China. *PeerJ* 7, e7949. <https://doi.org/10.7717/peerj.7949>.
- Zhang, Y., Peng, S., Chen, X., Chen, H.Y.H., 2022. Plant diversity increases the abundance and diversity of soil fauna: A meta-analysis. *Geoderma* 411, 115694. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115694>.
- Zhao, Z., Mao, Y., Gao, S., Lu, C., Pan, C., Li, X., 2023. Organic carbon accumulation and aggregate formation in soils under organic and inorganic fertilizer management practices in a rice–wheat cropping system. *Sci Rep* 13, 3665. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30541-y>.

4. ARTIGO II

Estoque de carbono orgânico do solo como serviço ecossistêmico de sistemas
agroflorestais de café: quantificação, valoração e análise econômica*

* **Situação:** não submetido

Estoque de carbono orgânico do solo como serviço ecossistêmico de sistemas agroflorestais de café: quantificação, valoração e análise econômica

Monalisa Fagundes Oliveira^a, Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia^b, Paulo Henrique Marques Monroe^b

^a Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Estrada do Bem Querer, Km 4, Caixa Postal 95, 45083-900 Vitória da Conquista, Bahia, Brasil.

^b Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB, Departamento de Engenharia Agrícola e Solos, Estrada do Bem Querer, Km 4, Caixa Postal 95, 45083-900 Vitória da Conquista, Bahia, Brasil.

Autor para correspondência: monalisaffagundes@gmail.com

RESUMO

Os sistemas agroflorestais (SAFs) são sistemas diversificados, conhecidos por sua atuação na conservação do solo e promoção de serviços ecossistêmicos. O estoque de carbono no solo é um dos principais serviços ecossistêmicos proporcionados pelos sistemas agroflorestais e tem papel estratégico na mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Apesar de estudos apontarem os impactos positivos da diversificação de cultivos de café no armazenamento de carbono, ainda é restrito o número de estudos que investigam os benefícios econômicos associados a esse impacto. Sendo assim, o presente estudo teve como objetivos: (1) quantificar o estoque de carbono no solo em sistemas de cultivo de café e em floresta nativa; (2) realizar a valoração econômica do armazenamento do carbono do solo como serviço ecossistêmico desses sistemas para identificar o potencial de comercialização de créditos de carbono; e (3) realizar análise da viabilidade econômica desses sistemas com e sem os créditos de carbono. O estudo foi conduzido em dois municípios do estado da Bahia (Planalto e Ibicoara), Brasil. Os estoques de carbono do solo (0-100 cm) foram estimados a partir da densidade e teores de carbono do solo (determinados por combustão seca em analisador elementar). Os valores de estoque de carbono foram utilizados para projetar cenários de mudança de uso do solo por meio de comparações entre os sistemas estudados. Estimou-se a valoração econômica dos cenários e o estoque total de carbono do solo em cada sistema de cultivo de café, incluindo seus ganhos. Os sistemas de cultivo de café no município de Ibicoara e os SAFs de café de Planalto mantiveram os estoques de carbono total do solo em relação à FN (0-100 cm). Nos cenários de Ibicoara, observou-se que a mudança de SAF-MB para SAF-SPM ou SAF-BMG proporcionou ganhos de 24,71 e 16,29 Mg ha⁻¹, respectivamente. Nesse mesmo município, a substituição do CF por SAFs proporcionou perdas no SAF-MB e ganhos no SAF-SPM e SAF-BMG. Por sua vez, em Planalto, o cenário de mudança de monocultivo (CM) para os SAFs resultou em ganhos de 21,62 Mg ha⁻¹ no SAF-B e de 10,29 Mg ha⁻¹ no SAF-G. Evidenciou-se um incremento no acúmulo de carbono em equivalente de CO₂ nos cenários que propiciaram ganhos. Todos os sistemas de café nos dois municípios registraram uma receita que excedeu os custos associados. Na análise dos sistemas de cultivo de café em Ibicoara, a relação benefício/custo (B/C) foi superior a 1 para todos os sistemas, indicando viabilidade econômica. Em Planalto, essa relação foi superior a 1 para os sistemas agroflorestais (SAF), porém, inferior a 1 para o monocultivo de café, destacando a eficácia econômica dos SAFs em relação ao modelo convencional. Sob a perspectiva econômica, os SAFs de café, juntamente com o consórcio de café com

forrageira, demonstraram desempenho financeiro favorável. O SAF-B destacou-se como a opção mais rentável, exibindo valores expressivos de Valor Presente Líquido (VPL), Benefício Periódico Equivalente (BPE) e Razão Benefício/Custo (B/C). Esses indicadores positivos não apenas indicam a viabilidade econômica, mas também a eficácia contínua desses sistemas a longo prazo. De maneira abrangente, a adoção de sistemas agroflorestais de café não apenas contribui para a redução das emissões de carbono, mas também se revela como uma estratégia economicamente viável e sustentável.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; SAF; Crédito de Carbono.

Soil organic carbon stock as an ecosystem service of coffee agroforestry systems: quantification, valuation, and economic analysis

Monalisa Fagundes Oliveira^a, Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia^b, Paulo Henrique Marques Monroe^b

^a State University of Southwest Bahia - UESB, Graduate Program in Agronomy, Estrada do Bem Querer, Km 4, PO Box, 45083-900, Vitória da Conquista, Bahia, Brazil.

^b State University of Southwest Bahia- UESB, Department of Agricultural Engineering and Soil, Estrada do Bem Querer, Km 4, PO Box 95, 45031-900, Vitória da Conquista, Bahia, Brazil.

Corresponding author: monalisaffagundes@gmail.com

ABSTRACT

Agroforestry systems (AFS) are diversified systems known for their role in soil conservation and promotion of ecosystem services. Soil carbon stock is one of the main ecosystem services provided by agroforestry systems and plays a strategic role in mitigating greenhouse gas emissions. Although studies indicate the positive impacts of diversifying coffee cultivation on carbon storage, the number of studies investigating the associated economic benefits of this impact is still limited. Therefore, this study aimed to: (1) quantify soil carbon stock in coffee cultivation systems and native forest; (2) conduct economic valuation of soil carbon storage as an ecosystem service of these systems to identify the potential for carbon credit commercialization; and (3) perform an economic viability analysis of these systems with and without carbon credits. The study was conducted in two municipalities in the state of Bahia (Planalto and Ibicoara), Brazil. Soil carbon stocks (0-100 cm) were estimated from soil density and carbon content (determined by dry combustion in an elemental analyzer). Carbon stock values were used to project land use change scenarios through comparisons between the studied systems. Economic valuation of scenarios and total soil carbon stock in each coffee cultivation system, including gains, were estimated. Coffee cultivation systems in the municipality of Ibicoara and coffee AFS in Planalto maintained total soil carbon stocks compared to NF (0-100 cm). In Ibicoara scenarios, changing from AFS-MB to AFS-SPM or AFS-BMG resulted in gains of 24.71 and 16.29 Mg ha⁻¹, respectively. In the same municipality, replacing CF with AFS resulted in losses in AFS-MB and gains in AFS-SPM and AFS-BMG. Conversely, in Planalto, changing from monoculture (MC) to AFS resulted in gains of 21.62 Mg ha⁻¹ in AFS-B and 10.29 Mg ha⁻¹ in AFS-G. There was an increase in carbon accumulation in CO₂ equivalent in scenarios that provided gains. All coffee systems in both municipalities generated revenue exceeding associated costs. In the analysis of coffee cultivation systems in Ibicoara, the benefit/cost ratio (B/C) was greater than 1 for all systems, indicating economic viability. In Planalto, this ratio was greater than 1 for agroforestry systems (AFS), however, less than 1 for coffee monoculture, highlighting the economic efficiency of AFS compared to the conventional model. From an economic perspective, coffee AFS, along with the coffee-grass consortium, demonstrated favorable financial performance. AFS-B stood out as the most profitable option, exhibiting significant values of Net Present Value (NPV), Equivalent Annual Benefit (EAB), and Benefit/Cost Ratio (B/C). These positive indicators not only indicate economic viability but also the continued effectiveness of these systems in the long term. In a comprehensive manner, the adoption of coffee agroforestry systems not only contributes to carbon

emissions reduction but also proves to be an economically viable and sustainable strategy.

Keywords: Climate change; AFS; Carbon Credit.

4.1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas tornaram-se uma preocupação em escala mundial, devido aos impactos negativos nos ecossistemas e na sociedade contemporânea. O incremento das emissões de gases de efeito estufa tem provocado uma série de desdobramentos, como o aquecimento global e a ocorrência mais frequente de eventos climáticos extremos. O enfrentamento dessas mudanças climáticas é debatido desde as últimas décadas, com enfoque na significativa capacidade dos solos atuarem como fator de estabilização climática dada a sua grande capacidade de armazenar carbono (McClean et al., 2015; FAO, 2021).

O solo é o maior reservatório natural de carbono dos ecossistemas terrestres, armazenando cerca de 2500 Pg C (Machado, 2005), o que corresponde a uma quantidade 4,5 vezes superior à contida na biota e 3,3 vezes superior à atmosfera (Lal et al., 2004). Diversos estudos têm se dedicado à quantificação do armazenamento de carbono em ecossistemas tropicais (Ehrenbergerová et al., 2016; Cerda et al., 2017; Koutouleas et al., 2022; Cañar et al., 2022; Niguse et al., 2022; Macedo et al., 2023; Matos et al., 2023; Baker et al., 2023). Embora normalmente constituam uma grande fonte emissora de CO₂, os ecossistemas agrícolas podem se comportar como dreno mediante a adoção de sistemas de manejo mais conservacionistas, que incrementem as entradas de carbono no solo (Lal, 2008; Nair et al., 2010; Nascimento et al., 2021; Matos et al., 2023) e evitem a perda deste elemento para a atmosfera na forma de CO₂.

Nesse cenário, os sistemas agroflorestais (SAFs) destacam-se por sua grande capacidade de sequestro de carbono no solo, especialmente quando comparados com cultivos agrícolas em monocultivo. A presença de árvores e outras plantas nos SAFs aumenta a biodiversidade e potencializa as entradas de resíduos vegetais, tanto via deposição de resíduos da biomassa aérea quanto das raízes, contribuindo para o aumento do estoque de carbono no solo (Gama-Rodrigues et al., 2011; Coltri et al., 2015; Dollinger e Jose, 2018; Zomer et al., 2022). Tais benefícios podem ser ainda mais marcantes em SAFs de café, uma vez que o cultivo de espécies perenes, como o cafeeiro, proporciona aporte contínuo de resíduos orgânicos (pela senescência natural ou podas) e o manejo do

solo com revolvimento, que ocorre apenas na implantação do sistema.

A cafeicultura é uma das *commodities* agrícolas mais amplamente exportadas, exercendo um impacto significativo na economia, especialmente em regiões tropicais. Em 2020, a produção global de café alcançou a marca de 171 milhões de sacas de 60 kg (ICO, 2023) e o setor de café gerou uma renda anual em escala global superior a \$200 bilhões, com expectativas de crescimento no mercado de 2,2% a cada ano (Bozzola et al., 2021). O Brasil lidera a produção mundial de café e se destaca como o terceiro maior consumidor da bebida, ficando atrás apenas da União Europeia e dos Estados Unidos (Conab, 2023; ICO, 2023). Essa realidade ressalta a importância da cultura do café na agricultura brasileira e o potencial de incorporação de sistemas de cultivo de café em iniciativas de créditos de carbono para mercados voluntários, bem como alternativa viável para a redução das emissões de gases de efeito estufa (Tumwebaze e Byakagaba, 2016).

Considerando o exposto, examinamos amostras de solo coletadas em sistemas de cultivo de café (monocultivo, consórcio e SAFs em diferentes combinações com árvores) em duas regiões produtoras de café no estado da Bahia e assumimos as hipóteses: (1) o aumento da diversidade de sistemas de cultivo de café influencia positivamente o armazenamento de carbono no solo e, como consequência, o incremento na receita; e (2) esse aumento da diversidade também beneficia a viabilidade econômica de projetos de sistemas de café, especialmente quando há a inclusão da venda de créditos de carbono. Sendo assim, o presente estudo teve como objetivos: (1) quantificar o estoque de carbono no solo em sistemas de cultivo de café e em floresta nativa; (2) realizar a valoração econômica do armazenamento do carbono do solo como serviço ecossistêmico desses sistemas para identificar o potencial de comercialização de créditos de carbono; e (3) realizar análise da viabilidade econômica desses sistemas com e sem os créditos de carbono.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Descrição das áreas

O estudo foi conduzido em duas regiões produtoras de café do estado da Bahia, Brasil, mais especificamente nos municípios de Planalto e Ibicoara (Figura 1), o primeiro representando a região produtora do Planalto da Conquista e o segundo a região produtora da Chapada Diamantina. O clima de ambas as regiões é classificado como tropical de

altitude (Cwb), de acordo com a classificação de Köppen. O município de Planalto apresenta temperatura média anual de 19,2 °C e precipitação pluviométrica anual de 750 mm, enquanto o município de Ibicoara apresenta valores de 20 °C e 977 mm para estas variáveis, respectivamente.

Os solos das áreas estudadas nos municípios de Planalto e Ibicoara, respectivamente, são classificados como Latossolo Amarelo distrófico e Argissolo Vermelho-Amarelo, de acordo com Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018); e Oxisol e Utisol, de acordo com o sistema Americano de classificação de solos (*USDA Soil Taxonomy*) (Soil Survey Staff, 2014).

4.2.2 Sistema de uso da terra

Um total de sete sistemas de cultivo de café foram avaliados: dois no município de Planalto e quatro no município de Ibicoara, englobando sistemas representativos das regiões produtoras (desde o monocultivo tradicional até sistemas agroflorestais biodiversos). Em cada município, uma floresta nativa localizada em área adjacente aos sistemas de café foi utilizada como sistema de referência. A Tabela 1 apresenta uma caracterização dos sistemas de cultivo (composição de espécies, área, distribuição e espaçamento entre plantas) e floresta nativa.

Os sistemas são compostos por: CF – Consórcio de café (*Coffea arabica L*) com gramínea forrageira (*Brachiaria ssp.*); SAF-MB – Sistema agroflorestal de *Coffea arabica L.* com mogno (*khaya grandifoliola*) e banana (*Musa spp.*); SAF-SPM – Sistema agroflorestal de *Coffea arabica L.* com sibipiruna (*Caesalpinia pluviosa*), paricá (*Schizolobium amazonicum*) e mogno (*Khaya grandifoliola*); SAF-BMG – Sistema agroflorestal de *Coffea arabica L.* com cedro (*Toona ciliata*), banana (*Musa spp.*), cacau (*Theobroma cacao*), mangueira (*Mangifera indica*), castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa*), grevilea (*Grevillea robusta*), fruta-pão (*Artocarpus altilis*), cinamomo (*Melia azedarach*) e mogno (*khaya grandifoliola*); CM – Monocultivo de café (*Coffea arabica L*); SAF-B – Sistema agroflorestal de café (*Coffea arabica L.*) com banana (*Musa spp.*); SAF-G – Sistema agroflorestal de café (*Coffea arabica L.*) com Grevilea (*Grevillea robusta*).

Os sistemas CF, SAF-MB, SAF-SPM e SAF-BMG estão localizados no município de Ibicoara e os sistemas CM, SAF-G e SAF-B no município de Planalto. Todos os sistemas foram implantados em áreas que anteriormente eram ocupadas por

pastagens ou cafezais. Os sistemas de Ibicoara foram estabelecidos adotando-se preparo do solo com aração e gradagem, com aplicação de calagem para a correção da acidez e adubação de plantio (5 L planta⁻¹ de esterco de vaca e 150 g planta⁻¹ de superfosfato simples). As adubações de cobertura foram realizadas com 0,6 kg planta⁻¹ de NPK 25-05-20, três vezes ao ano até 2008 e, após esse período, com 9,0 kg planta⁻¹ de compostos orgânicos (mistura de esterco de caprino, palha do próprio café, vagens trituradas de sibipiruna e leucena, cinzas e frutas decompostas) divididos em três aplicações. O controle de ervas espontâneas foi realizado por meio de utilização de roçadeira motorizada de duas a três vezes ao ano.

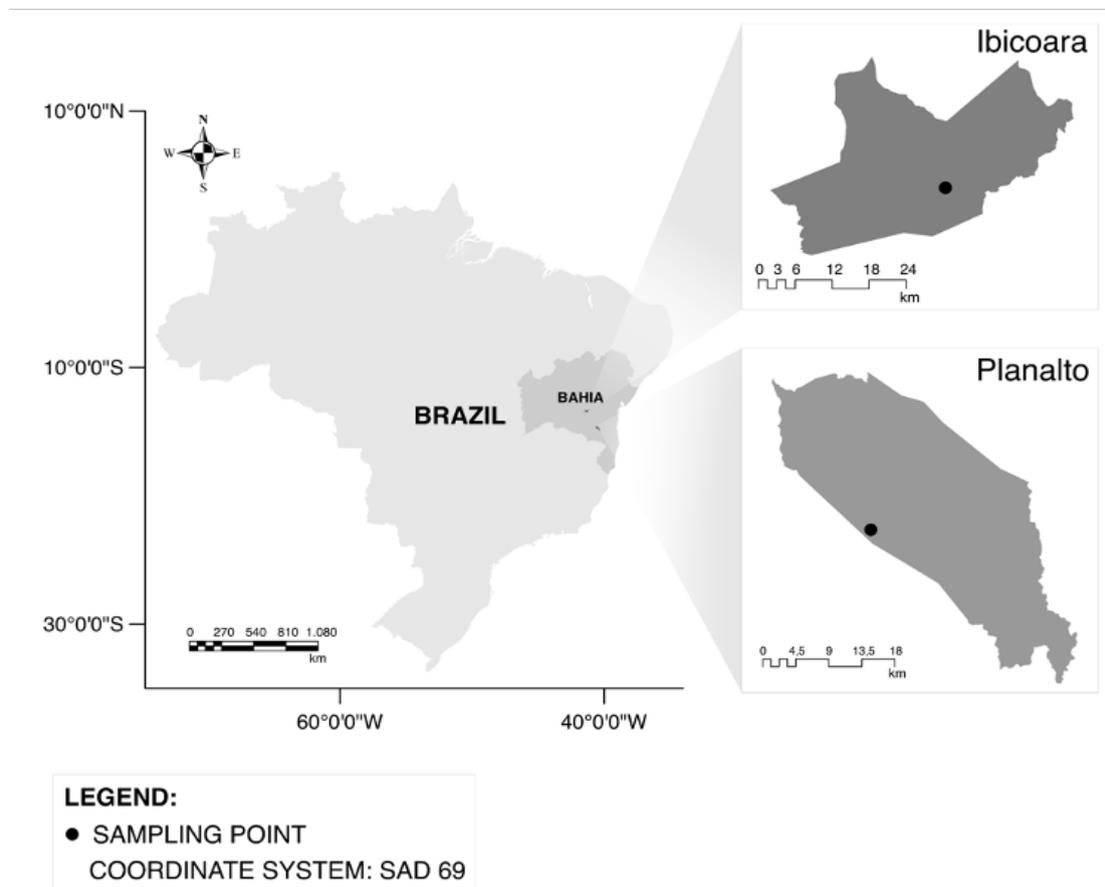


Figura 1 – Localização do município de Ibicoara e Lucaia, Bahia, Brasil.

Os dois fragmentos de floresta nativa possuem vegetação classificada como Floresta Estacional Semidecidual. A floresta nativa de Planalto (FNp) possui área de 30 ha e o de Ibicoara (FNi) 4,82 ha. Ambas apresentam estrato arbóreo relativamente baixo

(entre 10 e 15 m de altura), com predominância de ecótipos do gênero *Parapiptadenia* e *Anadenanthera* (IBGE, 2012) e estágio médio de regeneração, de acordo com os critérios descritos na Resolução CONAMA nº 01/1994 (Brasil, 1994), já que não sofreram intervenção há mais de 20 anos.

Tabela 1 - Caracterização de seis sistemas de cultivo de café (um consórcio com forrageira, um monocultivo e cinco sistemas agroflorestais) dos municípios de Ibicoara e Planalto, Bahia, Brasil.

Sigla	Espaçamento	Idade
CF	Entre cafeeiros: 3,0 × 1,0 m	6 anos
SAF-MB	Entre cafeeiros: 1,8 × 0,9 m; Entre bananeiras: 3,0 x 1,0 m; Entre mogno: 6,0 x 4,0 m	27 anos
SAF-SPM	Entre cafeeiro: 3,0 × 1,0 m; Entre mogno: 6,0 x 4,0 m; Entre sibipiruna: 3,0 x 3,0 m; Entre paricá 3,0 x 3,0 m	6 anos
SAF-BMG	Entre cafeeiros: 1,8 × 0,9 m; Entre bananeiras: 3,0 x 3,0 m; Entre cedro: 3,0 x 3,0 m; Entre cacau: 3,0 x 3,0 m; Entre mangueira: 10,0 x 9,0 m; Entre castanha-do-pará: 3,0 x 3,0 m; Entre grevilea: 3,0 x 3,0 m; Entre fruta-pão: 10,0 x 9,0 m; Entre cinamomo: 3,0 x 3,0 m	8 anos
CM	Entre cafeeiros: 1,5 x 2,5 m	15 anos
SAF-B	Entre cafeeiros: de 1,5 x 4,0 m; Entre bananeiras: 1,0 x 16,0 m	17 anos
SAF-G	Entre cafeeiros: 1,5 x 2,5 m; Entre árvores: 3,5 x 15,0 m; 3,5 m entre árvore e cafeeiro	17 anos

4.2.3 Amostragem do solo

As coletas de solo foram realizadas em março de 2020 (Planalto) e em setembro de 2021 (Ibicoara). Foram demarcadas de forma aleatória quatro parcelas de 20 × 20 m

em cada sistema do município de Planalto e três parcelas de 30 × 30 m em cada sistema do município de Ibicoara. Em cada parcela, foi aberta uma trincheira de 1 × 1 × 1,5 m entre as linhas de cultivo, onde foram retiradas amostras de solo em seis profundidades (0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm), conforme o protocolo utilizado em estudos internacionais sobre sequestro de carbono no solo (Gama-Rodrigues et al., 2010; Monroe et al., 2016 e Vicente et al., 2016; Vicente et al., 2019; Monroe et al., 2021).

Em cada profundidade foram coletadas amostras indeformadas com auxílio de anel volumétrico (98,17 cm³) que foi inserido horizontalmente nas mesmas camadas para caracterização do carbono do solo. As amostras foram secas em estufa a 105 °C por 48 h e pesadas para obtenção da massa seca, a qual foi utilizada para determinação da densidade (Teixeira et al., 2017).

4.2.4 Estoque de carbono no solo

As amostras de solo foram secas ao ar, passadas em peneira de 2 mm (terra fina seca ao ar - TFSA) e moídas em almofariz. A concentração de carbono das amostras foi determinada por combustão a seco em um analisador elementar automatizado Perkin Elmer 2400 series (analisador CHNS/O).

O estoque de carbono total do solo foi calculado com base nos teores de carbono, densidade e espessura de cada camada do solo, conforme equação (1). Os estoques das seis camadas do solo foram somados para obtenção do estoque a um metro de profundidade.

$$ECT = CT * DS * e \quad (1)$$

Em que: ECT = estoque de carbono total do solo (Mg ha⁻¹); CT = concentração de carbono total do solo (%); DS = densidade do solo (g cm⁻³); e = espessura da camada (cm).

Os valores de ECT foram corrigidos de acordo com a espessura da camada do solo, conforme proposto por Ellert e Bettany (1995), considerando-se a espessura da camada de solo do tratamento de referência (floresta nativa).

4.2.5 Cenários de mudanças no uso da terra

Para avaliar os ganhos ou perdas de carbono do solo com a adoção dos sistemas de cultivo de café, foram projetados cenários de mudança no uso da terra (ΔC) por meio de comparações entre os estoques de carbono dos sistemas de cada região produtora de

café (Tabela 2). A contribuição dos estoques de carbono da biomassa vegetal ou perdas de carbono devido à decomposição, uso de fertilizantes ou outros fatores não foram consideradas nesses cenários.

Tabela 2 - Cenários de mudança no uso da terra com sistemas de cultivo de café em dois municípios do estado da Bahia (Planalto e Ibicoara).

Ibicoara	Planalto
$\Delta C1i = \text{SAF-SPM} - \text{FNi}$	$\Delta C1p = \text{SAF-G} - \text{FNp}$
$\Delta C2i = \text{SAF-BMG} - \text{FNi}$	$\Delta C2p = \text{SAF-B} - \text{FNp}$
$\Delta C3i = \text{SAF-MB} - \text{FNi}$	$\Delta C3p = \text{CM} - \text{FNp}$
$\Delta C4i = \text{CF} - \text{FNi}$	$\Delta C4p = \text{SAF-G} - \text{CM}$
$\Delta C5i = \text{SAF-MB} - \text{SAF-BMG}$	$\Delta C5p = \text{SAF-B} - \text{CM}$
$\Delta C6i = \text{SAF-MB} - \text{SAF-SPM}$	
$\Delta C7i = \text{SAF-SPM} - \text{CF}$	
$\Delta C8i = \text{CF} - \text{SAF-BMG}$	
$\Delta C9i = \text{CF} - \text{SAF-MB}$	

Em que: $\Delta C1i$ a $\Delta C9i$ – cenários do município de Ibicoara; $\Delta C1p$ a $\Delta C5p$ – cenários do município de Planalto; FNi – floresta nativa Ibicoara, CF – consórcio de café com forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM – sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevêlea, fruta-pão, cinamomo e mogno; CM – monocultivo de café; SAF-B – Carbono do café com banana; SAF-G – Carbono do café com Grevêlea e FNp – floresta nativa Planalto.

4.2.6 Valoração do carbono do solo

Os cenários de mudanças de uso da terra que propiciaram ganhos foram considerados para estimar a valoração econômica do incremento de carbono. Além disso, também foi estimada a valoração econômica individual do estoque total de carbono do solo em 100 cm de profundidade de cada sistema de cultivo de café. Para isso, os valores de estoque de carbono foram convertidos ao equivalente de CO_2 , considerando a massa atômica desta substância, que é de aproximadamente 44,01, e do carbono, que é de 12,01 (IPCC, 2006). Dessa forma, estabeleceu-se um fator de conversão de 3,67, que

corresponde a razão 44,01/12,01. Adicionalmente, para fins de valoração econômica, considerou-se que cada tonelada de CO₂ equivalente tem o valor de US \$11,25, com uma taxa de câmbio de R\$ 4,98, totalizando R\$ 56,03. Esse valor corresponde ao preço encontrado em mercados voluntários de carbono (Trove Research, 2021).

4.2.7 Análise Econômica

Com propósito de verificar a viabilidade de projetos de implantação dos sistemas de cultivo com ou sem a venda dos créditos de carbono, foi realizada a análise econômica dos sete sistemas de cultivo de café estudados, admitindo custos e receitas de acordo com duas situações: (1) custos do projeto para a implantação dos sistemas e receitas obtidas com a venda dos produtos gerados; e (2) custos do projeto para implantação dos sistemas somados ao custo do projeto de crédito de carbono e receitas obtidas com a venda dos produtos juntamente com a venda dos créditos de carbono. Foram utilizados como critérios econômicos o valor presente líquido, razão benefício/custo e benefício periódico equivalente, que foram calculados conforme equação (2), (3) e (4).

$$VPL = \sum R_j (1+i)^{-j} - \sum C_j (1+i)^{-j} \quad (2)$$

Em que: VPL = Valor presente líquido; R_j = Receitas; i = Taxa de juros; j = Período em que as receitas ou os custos ocorrem; C_j = Custos.

$$R \left(\frac{B}{C} \right) = \frac{\sum R_j (1+i)^{-j}}{\sum C_j (1+i)^{-j}} \quad (3)$$

Em que: $R \left(\frac{B}{C} \right)$ é a razão benefício-custo a taxa de descontos i; VB (i) é o valor presente a taxa i da seqüência de benefícios; VC (i) é o valor presente, a taxa i, dos custos do projeto.

$$BPE = \frac{VPL[(1+i)^t - 1(1+i)^{-nt}]}{(1+i)^{nt} - 1} \quad (4)$$

Em que: BPE = benefício (ou renda) periódico equivalente; i = taxa de desconto; n = duração do projeto em unidade temporal considerada; t = número de períodos de capitalização.

O fluxo de caixa foi organizado de acordo com o descrito por Rezende e Oliveira (2001) de forma anual, levando em conta todos os custos e receitas. Os custos levaram em consideração os valores referentes à implantação dos sistemas (preparo do solo, mudas, mão de obra, insumos, valor da terra, custos com manutenção como aplicação de herbicidas ou adubo, bem como com a colheita e transporte dos produtos gerados), conforme adotado por Cotta et al. (2006). Além disso, foram considerados os custos do projeto para obtenção dos créditos de carbono, incluindo a necessidade de contratação de uma empresa denominada Entidade Operacional Designada, segundo a exigência do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Ministério da Ciência e Tecnologia (Ministério da ciência e tecnologia, 2009).

Os valores referentes às receitas foram obtidos por meio da estimativa do valor de venda dos créditos de carbono e dos produtos gerados nos sistemas (frutos do café, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, fruta-pão e cinamomo; madeiras das árvores de grevilea, mogno, sibipiruna, paricá e cedro). Assim, admitiu-se as seguintes produtividades por hectare para o fluxo de caixa dos sistemas de cultivo de café: CF – 20 sacas de café (1 saca = 60 kg); CM – de 18 sacas de café; SAF-MB – 26 sacas de café, 35 cachos de banana e 10 m³ de madeira; SAF-SPM – 26 sacas de café e 25 m³ de madeira; SAF-BMG – 26 sacas de café e 38 m³ de madeira, 15 cachos de banana, 5 sacas de cacau (1 saca = 23 kg), 300 kg de manga, 44 kg de castanha-do-pará e 144 kg de fruta-pão; SAF B – 200 m³ de madeira e 48 cachos de banana; SAF G – 15 sacas de café. Os valores dos produtos utilizados para o cálculo da receita total foram definidos de acordo com os valores do mercado no ano de 2024, que correspondiam a: R\$ 980,00/ saca de café; R\$53,24/cacho de banana; R\$ 6.529,53/m³ de madeira de mogno; R\$ 16,23/m³ de madeira de sibipiruna; R\$ 120,00/m³ de madeira de paricá; R\$320,00/saca de cacau; R\$3,22/ kg de manga; R\$37,00/kg de castanha-do-pará; R\$1,05/kg de fruta-pão; R\$250,00/m³ de madeira de cinamomo; R\$770,00/m³ de madeira de cedro; R\$60,00/m³ de madeira de Grevilea.

4.2.8 Análise estatística

Os dados de estoque e valoração econômica do carbono foram analisados quanto à normalidade (teste de Kolmogorov-Smirnov e Lilliefors) e homogeneidade da variância dos erros (teste de Bartlett). Após constatar dados paramétricos, os dados foram submetidos à análise de variância segundo um delineamento inteiramente casualizado,

adotando-se o teste LSD de Fisher a 5% de significância para comparação de médias. As análises estatísticas e elaboração de gráficos foram realizadas utilizando o *software* R (R Core Team 2023) e Sigma Plot versão 14.0 (Systat *Software* Inc., San Jose, California, USA).

4.3. RESULTADOS

4.3.1 Estoque de carbono do solo

Os sistemas de cultivo de café no município de Ibicoara proporcionaram a manutenção dos estoques de carbono total do solo em relação à FN (0-100 cm). SAF-SPM, SAF-BMG e CF não diferiram da FN, enquanto o SAF-MB apresentou valor inferior à FN (Figura 2A). Da mesma forma, os sistemas agroflorestais de café no município de Planalto também mantiveram os estoques de carbono total do solo em relação à FN. SAF-G e SAF-B não mostraram diferenciação da FN, enquanto o CM apresentou valor inferior à FN (Figura 2B), embora não tenha se diferenciado dos SAFs.

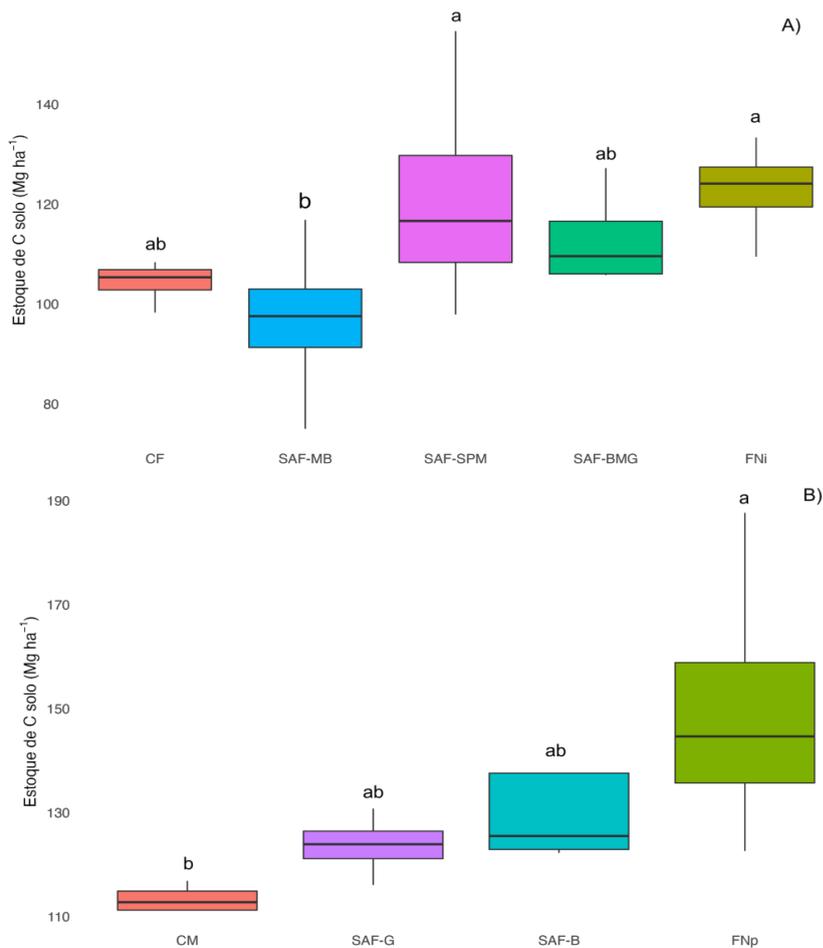


Figura 2 – Estoque de carbono total no solo (Mg ha^{-1}) de 0-100 cm em sistemas de cultivo de café e floresta nativa: A) Município de Ibicoara; e B) Município de Planalto. Em que: CF – consórcio de café com forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM- sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG - sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevílea, fruta-pão, cinamomo e mogno; FNi – floresta nativa Ibicoara; CM – monocultivo de café; SAF-B – Carbono do café com banana; SAF-G – Carbono do café com Grevílea; e FNp – floresta nativa Planalto. Letras iguais acima das barras não diferem entre si pelo teste Fisher LSD a 5% de significância.

4.3.2 Variações de carbono do solo em diferentes cenários

Os cenários de substituição da floresta nativa (FN) por sistemas de cultivo de café proporcionou redução do estoque de carbono no solo em ambos os municípios estudados (Figura3A e Figura3B). Em Ibicoara, a maior perda foi observada no SAF-MB ($-26,01 \text{ Mg ha}^{-1}$), enquanto o SAF-SPM apresentou a menor perda ($-1,30 \text{ Mg ha}^{-1}$). No contexto do município de Planalto, o CM apresentou a maior perda ($36,52 \text{ Mg ha}^{-1}$), seguido pelo

SAF-G (26,23 Mg ha⁻¹) e pelo SAF-B (14,90 Mg ha⁻¹).

Nos cenários de Ibicoara, observou-se que a mudança de SAF-MB para SAF-SPM ou SAF-BMG proporcionou ganhos de 24,71 e 16,29 Mg ha⁻¹, respectivamente (Figura 3.C). Nesse mesmo município, a substituição do CF por SAFs (Figura 3E) proporcionou perdas no SAF-MB e ganhos no SAF-SPM e SAF-BMG. Por sua vez, em Planalto, o cenário de mudança de monocultivo (CM) para os SAFs (Figura 3D) resultou em ganhos de 21,62 Mg ha⁻¹ no SAF-B e de 10,29 Mg ha⁻¹ no SAF-G.

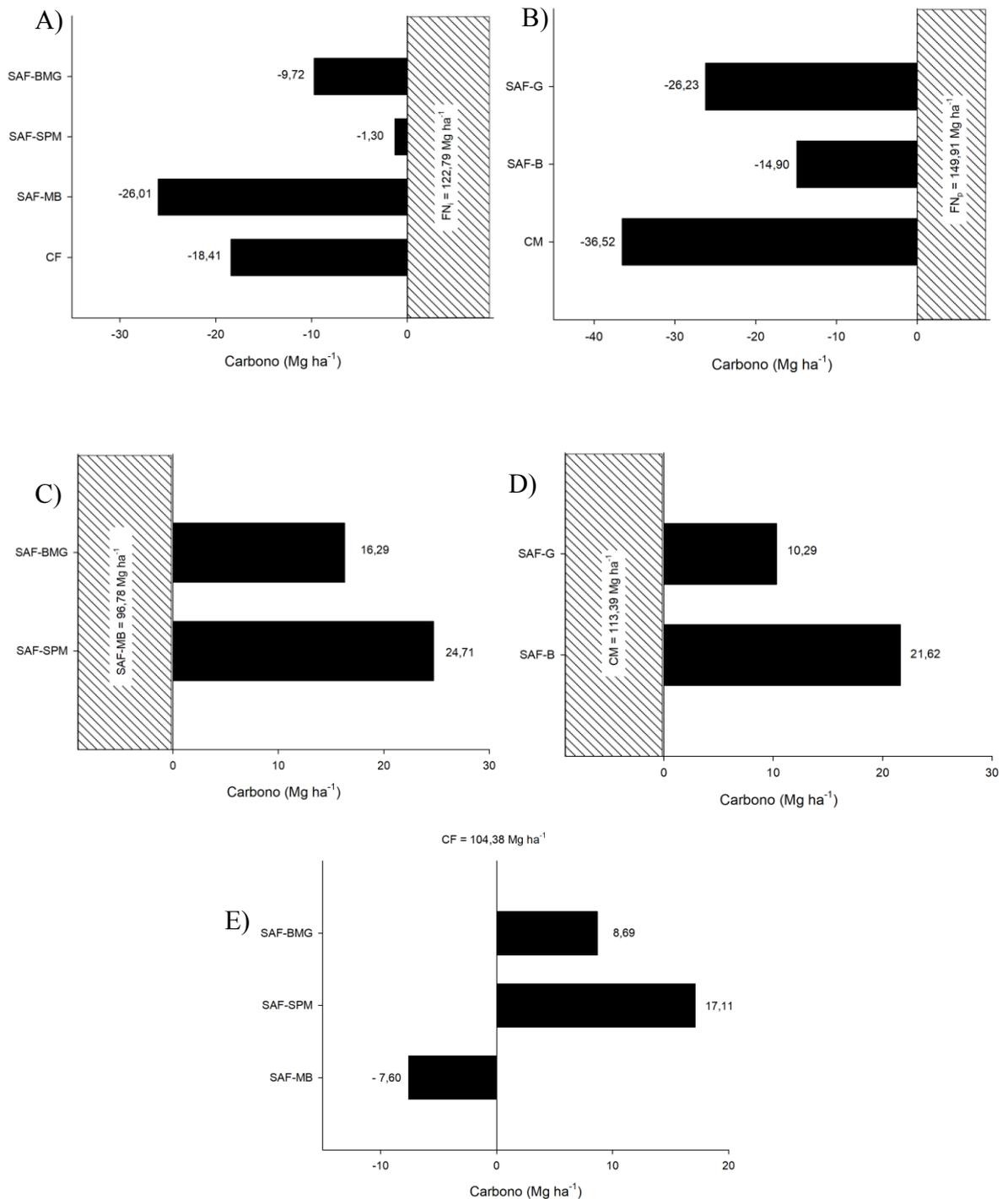


Figura 3 – Perdas e ganhos no estoque de carbono total do solo (Mg ha^{-1}) de 0-100 cm em sistemas de cultivo de café e floresta nativa: A) Perdas de carbono no solo em Ibicoara; B) Perdas de carbono no solo em Planalto; C) Ganho de carbono no solo em Ibicoara; D) Ganho de carbono no solo em Planalto; e E) Perdas e ganhos de carbono no solo em Ibicoara em relação ao CF. Em que: CF – consórcio de café com forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM – sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevílea, fruta-pão, cinamomo e mogno; FNi – floresta nativa Ibicoara; CM – monocultivo de café; SAF-B – Carbono do café com banana; SAF-G – Carbono do café com Grevílea; e FNp – floresta nativa Planalto.

4.3.3 Valoração do estoque de carbono

Os valores de acúmulo de carbono em equivalente de CO_2 decorrentes dos cenários que propiciaram ganhos e seus respectivos valores monetários são apresentados na Tabela 3. No município de Ibicoara e Planalto, a implementação de diferentes sistemas agrícolas resulta em ganhos monetários distintos. Em Ibicoara, a adoção do SAF-SPM representa um incremento financeiro de R\$ 4.971,11 em relação ao SAF-MB, bem como em relação ao CF, onde os ganhos alcançam R\$ 3.442,76. Por sua vez, a opção pelo SAF-BMG gera um ganho de R\$ 3.277,19 comparado ao SAF-MB. No contexto de Planalto, a adoção do SAF-G proporciona um ganho monetário de R\$ 2.070,12 em relação ao CM, enquanto a escolha do SAF-B resulta em um aumento de R\$ 4.349,47 em comparação ao CM.

Tabela 3 - Cenários, CO_2 equivalente e valor monetário de mudança no uso da terra com sistemas de cultivo de café em dois municípios do estado da Bahia (Planalto e Ibicoara).

Município	Cenários	CO_2	
		equivalente (Mg ha^{-1})	Valor monetário (R\$)
Ibicoara	$\Delta\text{C5i} = \text{SAF-MB} - \text{SAF-BMG}$	59,69	R\$ 3.277,19
	$\Delta\text{C6i} = \text{SAF-MB} - \text{SAF-SPM}$	90,55	R\$ 4.971,11
	$\Delta\text{C7i} = \text{SAF-SPM} - \text{CF}$	62,71	R\$ 3.442,76
	$\Delta\text{C8i} = \text{CF} - \text{SAF-BMG}$	31,86	R\$ 3.277,19

Planalto	$\Delta C4p = \text{SAF-G} - \text{CM}$	37,71	R\$ 2.070,12
	$\Delta C5p = \text{SAF-B} - \text{CM}$	79,23	R\$ 4.349,47

Em que: $\Delta C5i$ a $\Delta C9i$ – cenários do município de Ibicoara; $\Delta C1p$ a $\Delta C5p$ – cenários do município de Planalto; FNi – floresta nativa Ibicoara; CF – consórcio de café com forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM – sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevilea, fruta-pão, cinamomo e mogno; CM – monocultivo de café; SAF-B – Carbono do café com banana; SAF-G – Carbono do café com Grevilea; e FNp – floresta nativa Planalto.

4.3.4 Análise Econômica

Os resultados da análise econômica dos sistemas agroflorestais com o projeto de crédito de carbono nos municípios de Ibicoara e Planalto estão apresentados nas Tabela 4 e Tabela 5. Todos os sistemas de café dos dois municípios apresentaram uma receita que superou o custo.

Em Ibicoara, a adoção do SAF-BMG proporcionou maior diferença entre receita e custos, e o CF menor diferença entre receita e custos. O SAF-B, em Planalto, foi o sistema que registrou a maior diferença entre receita e custos, enquanto o sistema CM obteve a menor diferença entre receita e custos.

Tabela 4 - Receitas totais (R\$) dos sistemas em sete sistemas de cultivo de café do município de Ibicoara e Planalto, Bahia.

Período	CF	SAF-			CM	SAF-B	SAF-G
		SAF-MB	SPM	BMG			
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	19.600,00	25.480,00	25.480,00	25.480,00	14.700,00	34.300,00	19.600,00
3	19.600,00	32.667,40	25.480,00	42.266,80	14.700,00	41.966,56	19.600,00
4	19.600,00	32.667,40	25.480,00	42.266,80	14.700,00	41.966,56	19.600,00
5	19.600,00	32.667,40	25.480,00	42.266,80	14.700,00	41.966,56	19.600,00
6	19.600,00	32.667,40	25.480,00	42.266,80	14.700,00	41.966,56	19.600,00
7	19.600,00	32.667,40	25.480,00	42.266,80	14.700,00	41.966,56	19.600,00
8	19.600,00	32.667,40	25.480,00	42.266,80	14.700,00	41.966,56	19.600,00
9	19.600,00	32.667,40	25.480,00	42.266,80	14.700,00	41.966,56	19.600,00

10	19.600,00	32.667,40	25.480,00	42.266,80	14.700,00	41.966,56	19.600,00
11	19.600,00	32.667,40	25.480,00	42.266,80	14.700,00	41.966,56	19.600,00
12	19.600,00	32.667,40	25.480,00	42.266,80	14.700,00	41.966,56	19.600,00
13	19.600,00	32.667,40	25.480,00	42.266,80	14.700,00	41.966,56	19.600,00
14	19.600,00	32.667,40	25.480,00	42.266,80	14.700,00	41.966,56	19.600,00
15	19.600,00	32.667,40	25.480,00	42.266,80	14.700,00	41.966,56	19.600,00
16	19.600,00	32.667,40	25.480,00	42.266,80	14.700,00	41.966,56	19.600,00
17	19.600,00	32.667,40	25.480,00	42.266,80	14.700,00	41.966,56	19.600,00
18	19.600,00	32.667,40	25.480,00	42.266,80	14.700,00	41.966,56	19.600,00
19	19.600,00	32.667,40	25.480,00	42.266,80	14.700,00	41.966,56	19.600,00
20	19.600,00	98.698,87	95.694,66	123.363,63	14.700,00	43.596,89	33.093,63

Em que: CF – consórcio de café com forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM – sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevílea, fruta-pão, cinamomo e mogno; CM – monocultivo de café; SAF-B – Carbono do café com banana; SAF-G – Carbono do café com Grevílea.

Tabela 5 - Custos totais (R\$) dos sistemas em sete sistemas de cultivo de café do município de Ibicoara e Planalto, Bahia.

Período	SAF-		SAF-		CM	SAF-B	SAF-G
	CF	SAF-MB	SPM	BMG			
0	13.437,50	12.659,91	12.923,16	13.649,91	13.437,50	13.461,91	13.424,41
1	7.232,50	7.582,50	7.232,50	7.232,50	7.232,50	7.582,50	7.232,50
2	12.084,56	10.416,62	13.134,56	14.184,56	12.084,56	10.066,62	12.434,56
3	13.134,56	11.466,62	14.184,56	18.594,56	13.134,56	11.116,62	13.484,56
4	13.134,56	11.466,62	14.184,56	15.094,56	13.134,56	11.116,62	13.484,56
5	13.134,56	11.466,62	14.184,56	15.094,56	13.134,56	11.116,62	13.484,56
6	13.134,56	11.466,62	14.184,56	15.094,56	13.134,56	11.116,62	13.484,56
7	13.134,56	11.466,62	14.184,56	15.094,56	13.134,56	11.116,62	13.484,56
8	13.134,56	11.466,62	14.184,56	15.094,56	13.134,56	11.116,62	13.484,56
9	13.134,56	11.466,62	14.184,56	15.094,56	13.134,56	11.116,62	13.484,56
10	13.134,56	11.466,62	14.184,56	15.094,56	13.134,56	11.116,62	13.484,56
11	13.134,56	11.466,62	14.184,56	15.094,56	13.134,56	11.116,62	13.484,56

12	13.134,56	11.466,62	14.184,56	15.094,56	13.134,56	11.116,62	13.484,56
13	13.134,56	11.116,62	14.184,56	14.134,56	13.134,56	11.116,62	13.484,56
14	13.134,56	11.466,62	14.184,56	15.444,56	13.134,56	11.116,62	13.484,56
15	13.134,56	11.466,62	14.184,56	14.744,56	13.134,56	11.116,62	13.484,56
16	13.134,56	11.466,62	14.184,56	15.094,56	13.134,56	11.116,62	13.484,56
17	13.134,56	11.466,62	14.184,56	15.094,56	13.196,62	11.116,62	13.484,56
18	13.134,56	11.466,62	14.184,56	15.094,56	13.054,56	11.116,62	13.484,56
19	13.134,56	11.466,62	14.184,56	15.094,56	12.912,50	11.116,62	13.484,56
20	13.134,56	11.398,68	15.730,74	16.432,80	13.054,56	11.116,62	14.466,62

Em que: CF – consórcio de café com forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM – sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevilea, fruta-pão, cinamomo e mogno; CM – monocultivo de café; SAF-B – Carbono do café com banana; SAF-G – Carbono do café com Grevílea.

A Tabela 6, a seguir, apresenta a análise econômica para os sete sistemas de cultivo de café estudados. No geral, os sistemas de cultivo de café nos dois municípios demonstraram viabilidade econômica, com exceção do sistema CM no município de Planalto. Em Ibicoara, o SAF-BMG destacou-se com os maiores valores para o Valor Presente Líquido (VPL) e o Benefício Periódico Equivalente (BPE), atingindo R\$ 246.299,43 e R\$ 25.086,14, respectivamente. Por outro lado, o CM em Planalto apresentou valores negativos para VPL (-R\$ 5.241,94) e BPE (-R\$ 533,90), enquanto o SAF-B registrou os maiores valores de VPL e BPE entre esses sistemas de cultivo de café.

Na análise dos sistemas de cultivo de café em Ibicoara, constatou-se que a razão benefício/custo (B/C) foi maior que 1 para todos os sistemas, com destaque para o SAF-BMG, que apresentou o maior valor (2,58), enquanto o CF registrou o menor valor (1,28). Em Planalto, a razão benefício/custo foi superior a 1 para os SAF, porém, inferior a 1 para o CM.

Tabela 6 - Análise econômica dos sistemas em sete sistemas de cultivo de café do município de Ibicoara e Planalto, Bahia.

Município	Sistemas	VPL (R\$)	BPE (R\$)	B/C
Ibicoara	CF	R\$ 38.258,08	R\$ 3.896,67	1,28

	SAF-MB	R\$ 151.414,56	R\$ 15.421,91	2,26
	SAF-SPM	R\$ 96.454,54	R\$ 9.824,11	1,66
	SAF-BMG	R\$ 246.299,43	R\$ 25.086,14	2,58
	CM	-R\$ 5.241,94	-R\$ 533,90	0,96
Planalto	SAF-B	R\$ 250.221,17	R\$ 25.485,58	3,11
	SAF-G	R\$ 50.906,80	R\$ 5.184,97	1,36

Em que: CF – consórcio de café com forrageira; SAF-MB – sistema agroflorestal de café com banana e mogno; SAF-SPM – sistema agroflorestal de café com sibipiruna, paricá e mogno; SAF-BMG – sistema agroflorestal de café com cedro, banana, cacau, mangueira, castanha-do-pará, grevilea, fruta-pão, cinamomo e mogno; SAF-B – Carbono do café com banana; SAF-G – Carbono do café com Grevilea e CM – monocultivo de café.

4.4 DISCUSSÃO

4.4.1 Estoque de carbono do solo

A manutenção dos estoques de carbono total do solo nos sistemas agroflorestais de café de ambos os municípios e a redução no sistema CM (Figura 2) pode ser atribuída às influências do componente arbóreo (Isaac e Borden, 2019), proporcionando uma entrada diversificada de resíduos com diferentes taxas de decomposição (Jose, 2009; Tonucci et al., 2023). Adicionalmente, as árvores têm um sistema radicular forte e extenso que explora as camadas mais profundas do solo mais do que quaisquer culturas anuais e arbustos (Lorenz e Lal, 2014). Assim, uma considerável quantidade de biomassa radicular atinge camadas mais profundas do solo (Siegwart et al., 2023), contribuindo para as entradas de carbono e desempenhando um papel na acumulação do carbono no solo (Corbeels et al., 2019).

Quanto à manutenção no estoque de carbono no solo do CF (Figura 2A), esta é atribuída ao manejo empregado nessas áreas, como também à presença de gramíneas forrageiras no CF, que possuem um sistema radicular abundante capaz de acumular carbono no solo ao longo do tempo (Salton et al., 2011).

A média do estoque de carbono no solo encontrado neste estudo está em consonância com resultados de pesquisas anteriores em sistemas agroflorestais de café. Por exemplo, Zaro et al. (2020) realizaram um estudo em Londrina-PR, Brasil, analisando o estoque de carbono em diferentes profundidades em sistemas agroflorestais de café, e encontraram uma média de 117,51 a 117,86 Mg ha⁻¹ dessa substância. Em outro estudo,

Ehrenbergerová et al. (2016) investigaram o armazenamento de carbono no solo em sistemas agroflorestais de café em Villa Rica/Peru, e constataram uma média de 99,7 a 177,5 Mg ha⁻¹. Além disso, Chatterjee et al. (2020) estudaram o estoque de carbono em sistemas agroflorestais de café em Turrialba/Costa Rica, e obtiveram uma média de estoque de carbono de 92,5 a 146,6 Mg ha⁻¹ em diferentes profundidades.

4.4.2 Variações de carbono do solo em diferentes cenários

As perdas de carbono decorrentes da conversão de sistemas naturais em SAFs, consórcios ou monocultivos são ocasionadas por alterações antrópicas no uso da terra que impactam os atributos físicos, químicos e biológicos do solo (Schulz et al. , 2016; Santana et al., 2019). Esses atributos são fundamentais para o desenvolvimento das plantas e para o armazenamento de carbono.

A transição dos SAFs (SAF-SPM e SAF-BMG) para o SAF-MB resultou em perdas, atribuídas à menor entrada de resíduos vegetais e à taxa de decomposição mais rápida, levando a uma redução mais significativa do estoque de carbono orgânico no solo. Os ganhos observados no SAF-SPM podem ser explicados pela presença da sibipiruna, que adiciona mais nitrogênio ao sistema e influencia a taxa de decomposição dos resíduos vegetais, contribuindo assim para a manutenção ou aumento do estoque de carbono no solo em comparação com o SAF-MB. No SAF-BMG, os ganhos podem ser atribuídos às espécies de árvores de rápido crescimento, as quais acumulam as entradas de resíduos provenientes das podas das árvores e acumulam carbono orgânico do solo, especialmente em idades iniciais (Cardinael et al., 2017).

Nos cenários de Planalto, os ganhos na mudança do monocultivo de café (CM) para os SAFs (Figura 3D) são atribuídos ao acúmulo e à renovação de serapilheira e raízes, os quais proporcionam um fornecimento contínuo de matéria orgânica ao solo pelos sistemas agroflorestais (Chatterjee et al., 2020). Outro fator relevante para as diferenças nos estoques de carbono é a profundidade do solo, como apontado por Thakur, Kumar e Kunhamu (2015), os quais sugerem que as plantações de árvores contribuem para o aumento do carbono nas camadas mais profundas por meio da rizodeposição e da decomposição de raízes finas.

4.4.3 Valoração do estoque de carbono

Os ganhos distintos com a valoração monetária do carbono sequestrado (CO₂e) dependem muito da taxa de acumulação do carbono e do preço do mercado deste, o que justifica os ganhos distintos dos sistemas de cultivo de ambos os municípios. Além disso, é importante ressaltar que o preço do carbono depende de muitos fatores econômicos, tecnológicos e políticos que impactam a procura e a oferta de créditos de carbono (Waldén et al., 2020).

A vantagem financeira dos sistemas agroflorestais (SAFs) em ambos os municípios com a valoração do CO₂e ressalta o potencial da receita de carbono como um incentivo adicional para a transição do monocultivo para os SAFs, complementando outros benefícios, como os rendimentos monetários. Esses achados corroboram com diversos estudos que enfatizam a superioridade dos SAFs em relação às monoculturas, oferecendo aos produtores benefícios econômicos mais substanciais e destacando seu potencial para a geração de receita adicional por meio da valoração do carbono sequestrado (Magcale-Macandog et al., 2010; Santos Martin e Van Noordwijk, 2011; Waldén et al., 2020).

4.4.4 Análise Econômica

Os resultados da análise econômica para todos os sistemas de cultivo de café demonstraram que independente dos sistemas, os valores das receitas no fluxo de caixa são superiores aos seus custos. O maior lucro encontrado no sistema SAF-BMG é justificado, pois além da produção do café, o produtor se beneficia com a receita decorrente da produção das demais oito espécies. A diversificação de culturas, característica desse sistema, não só contribui para uma receita mais robusta e sustentável ao produtor, mas também está em consonância com estudos que ressaltam a importância da variedade de produtos em sistemas agroflorestais. Essa abordagem não apenas eleva a qualidade dos produtos, mas também aumenta o rendimento e a rentabilidade da propriedade, maximizando a renda e reduzindo alguns custos (Rois-Díaz et al., 2018; Sagastuy e Krause, 2019).

A receita bruta registrada no CF, no valor de R\$19.600,00, revela-se economicamente favorável e está em linha com os achados de Goes e Chinelato (2018), ao estudarem a viabilidade econômico-financeira do monocultivo de café arábica na região da Alta Mogiana (R\$16.738,00). No entanto, é importante notar que a produtividade encontrada neste estudo (20 sacas ha⁻¹) difere daquela considerada pelos

autores mencionados (34,4 sacas ha⁻¹), podendo ser influenciada por variações cambiais, uma vez que o preço do café é cotado em dólar, e a taxa de câmbio teve alterações significativas de 2018 a 2024.

De forma conjunta, os sistemas agroflorestais de café e o consórcio de café com forrageira mostraram-se viáveis economicamente, com valores de VPL e BPE positivos, além de uma razão B/C superior a um. O SAF-B destacou-se como a opção mais rentável nesses índices, evidenciado pelo maior ganho em VPL, BPE e B/C. Por outro lado, o CM apresentou valores negativos e razão B/C menor que um, evidenciando inviabilidade no projeto para esse quesito.

Conforme apontado por Rezende e Oliveira (2001), um indicativo da eficácia de um projeto é o seu benefício periódico equivalente (BPE), que reflete a capacidade de geração de benefícios ao longo do tempo. Nesse contexto, observa-se que os sistemas agroflorestais SAF-BMG e SAF-B destacam-se ao apresentar os valores mais expressivos de BPE. No entanto, é relevante notar que o desempenho superior do SAF-B em relação aos outros SAFs pode estar relacionado à abordagem que focou exclusivamente na quantificação do carbono do solo, sem abranger a serapilheira e a biomassa aérea.

Paulus et al. (2021), que estudaram a viabilidade financeira de arranjos agroflorestais biodiversos, encontraram valores positivos para o VPL (R\$ 7.917,62), BPE (507,89) e B/C (1,1) no sistema de café com banana. Valor positivo para a relação B/C no sistema também foi encontrado por Siqueira et al. (2020) ao estudarem consórcios de café conilon e espécies perenes e florestais no Espírito Santo.

Os valores da razão benefício/custo obtidos nos SAFs maiores que 1 denota que o investimento é positivo e que a cultura do café em sistemas agroflorestais é viável. O valor do consórcio de café com forrageira condiz com o observado por Santos e Campos (2020) em análise da viabilidade econômica da produção cafeeira em um intervalo de 20 anos (B/C = 1,02).

É notório que uma parcela substancial do carbono armazenado em sistemas agroflorestais, em especial, encontra-se na biomassa acima do solo. Além disso, estudos científicos sugerem que o cultivo de café em SAFs podem potencializar a capacidade de acumulação de carbono na biomassa acima do solo (Feliciano et al., 2018). Portanto, a inclusão dessa variável na análise teria impacto significativo nas receitas do projeto de crédito de carbono para os demais sistemas de café. Ademais, é relevante salientar que o sistema de café em associação com culturas frutíferas proporciona receitas anuais provenientes dessas culturas, enquanto que, no sistema de café com apenas espécies

madeiras (SAF-SPM e SAF-G), o incremento na receita em relação ao monocultivo de café ocorre apenas no 20º ano, quando ocorre o corte e a venda do material lenhoso.

4.5 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo respaldam a hipótese de que o aumento da diversidade de sistemas de cultivo de café influencia positivamente o armazenamento de carbono no solo e, como consequência, a sua valoração econômica.

Sob a perspectiva econômica, os sistemas agroflorestais de café, juntamente com o consórcio de café com forrageira, demonstraram desempenho financeiro favorável. A análise econômica reforça a viabilidade desses sistemas, com receitas superando custos, especialmente no caso do SAF-BMG. O SAF-B destacou-se como a opção mais rentável, exibindo valores expressivos de Valor Presente Líquido (VPL), Benefício Periódico Equivalente (BPE) e Razão Benefício/Custo (B/C). Esses indicadores positivos não apenas indicam a viabilidade econômica, mas também a eficácia contínua desses sistemas a longo prazo.

De maneira abrangente, a adoção de sistemas agroflorestais de café não apenas contribui para a redução das emissões de carbono, mas também se revela como uma estratégia economicamente viável e sustentável.

4.6 REFERÊNCIAS

Baker, T.J., Kaiser, M., Turk, J.K., 2023. Predicting Soil Organic Carbon from Loss-On-Ignition Across Four Regions of Nebraska. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 54, 2301–2312. <https://doi.org/10.1080/00103624.2023.2217841>.

Bozzola, M., Charles, S., Ferretti, T., Gerakari, E., Manson, H., Rosser, N., Goltz, P., 2021. *The Coffee Guide*, Fourth Edition.

Cañar, J.P.M., Díaz, D.A., Marín, Á.J.C., 2022. Evaluation of carbon capture in coffee production systems in the department of Nariño. *Trends in Horticulture* 5, 83–92. <https://doi.org/10.24294/th.v5i2.1832>.

Cerda, R., Allinne, C., Gary, C., Tixier, P., Harvey, C.A., Krolczyk, L., Mathiot, C., Clément, E., Aubertot, J.-N., Avelino, J., 2017. Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee agroecosystems. *European Journal of Agronomy, Farming systems analysis and design for sustainable intensification: new methods and assessments* 82, 308–319. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.019>.

Chatterjee, N., Nair, P.K.R., Nair, V.D., Bhattacharjee, A., Filho, E. de M.V., Muschler, R.G., Noponen, M.R.A., 2020. Do Coffee Agroforestry Systems Always Improve Soil Carbon Stocks Deeper in the Soil?—A Case Study from Turrialba, Costa Rica. *Forests* 11, 49. <https://doi.org/10.3390/f11010049>.

Coltri, P.P., Zullo Junior, J., Dubreuil, V., Ramirez, G.M., Pinto, H.S., Coral, G., Lazarim, C.G., 2015. Empirical models to predict LAI and aboveground biomass of *Coffea arabica* under full sun and shaded plantation: a case study of South of Minas Gerais, Brazil. *Agroforest Syst* 89, 621–636. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9799-5>.

Conab, 2023. Conab - Boletim da Safra de Café Disponível em: <http://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe>.

Cotta, M.K., Jacovine, L.A.G., Valverde, S.R., Paiva, H.N. de, Virgens Filho, A. de C., Silva, M.L. da, 2006. Análise econômica do consórcio seringueira-cacau para geração de certificados de emissões reduzidas. *Rev. Árvore* 30, 969–979. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000600012>.

Dollinger, J., Jose, S., 2018. Agroforestry for soil health. *Agroforest Syst* 92, 213–219. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0223-9>.

Ehrenbergerová, L., Cienciala, E., Kučera, A., Guy, L., Habrová, H., 2016. Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. *Agroforest Syst* 90, 433–445. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9865-z>.

FAO, 2021. Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação: Mapa lança bases para promoção da agricultura de baixo carbono até 2030 | FAO no Brasil | Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Feliciano, D., Ledo, A., Hillier, J., Nayak, D.R., 2018. Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 254, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.032>.

Gama-Rodrigues, E.F., Gama-Rodrigues, A.C., Nair, P.K.R., 2011. Soil Carbon Sequestration in Cacao Agroforestry Systems: A Case Study from Bahia, Brazil, in: Kumar, B.M., Nair, P.K.R. (Eds.), *Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems: Opportunities and Challenges, Advances in Agroforestry*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 85–99. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1630-8_5.

Goes, T.B., Chinelato, G.A., 2018. Viabilidade econômico-financeira da cultura do café arábica na região da Alta Mogiana. *Revista Ipecege* 4, 31–39. <https://doi.org/10.22167/r.ipecege.2018.4.31>.

ICO, 2023. Relatórios Especializados | Organização Internacional do Café. Disponível em: <https://icocoffee.org/pt/specialized-reports/>.

IPCC, T.I.P. on C.C., 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories — IPCC.

Isaac, M.E., Borden, K.A., 2019. Nutrient acquisition strategies in agroforestry systems. *Plant Soil* 444, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04232-5>.

Jose, S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforest Syst* 76, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>.

Koutouleas, A., Sarzynski, T., Bordeaux, M., Bosselmann, A.S., Campa, C., Etienne, H., Turreira-García, N., Rigal, C., Vaast, P., Ramalho, J.C., Marraccini, P., Ræbild, A., 2022. Shaded-Coffee: A Nature-Based Strategy for Coffee Production Under Climate Change? A Review. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 6.

Lal, R., Griffin, M., Apt, J., Lave, L., Morgan, M.G., 2004. Ecology. Managing soil carbon. *Science* 304, 393. <https://doi.org/10.1126/science.1093079>.

Lorenz, K., Lal, R., 2014. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34, 443–454. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0212-y>.

Macedo, R.S., Moro, L., dos Santos Sousa, C., de Almeida Alves Carneiro, K., Campos, M.C.C., de Bakker, A.P., Beirigo, R.M., 2023. Agroforestry can improve soil fertility and aggregate-associated carbon in highland soils in the Brazilian northeast. *Agroforest Syst*. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00875-7>.

Machado, P.L.O. de A., 2005. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Quím. Nova* 28, 329–334. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000200026>.

Magcale-Macandog, D.B., Rañola, F.M., Rañola, R.F., Ani, P.A.B., Vidal, N.B., 2010. Enhancing the food security of upland farming households through agroforestry in Claveria, Misamis Oriental, Philippines. *Agroforest Syst* 79, 327–342. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9267-1>.

Matos, P.S., Pinto, L.A. da S.R., Lima, S.S. de, Alves, T. de C., Cerri, E.P., Pereira, M.G., Zonta, E., 2023. Soil organic carbon fractions in agroforestry system in Brazil: seasonality and short-term dynamic assessment. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 47, e0220095. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220095>.

McClellan, G.J., Rowe, R.L., Heal, K.V., Cross, A., Bending, G.D., Sohi, S.P., 2015. An empirical model approach for assessing soil organic carbon stock changes following biomass crop establishment in Britain. *Biomass and Bioenergy* 83, 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.09.005>.

Niguse, G., Iticha, B., Kebede, G., Chimdi, A., 2022. Contribution of coffee plants to carbon sequestration in agroforestry systems of Southwestern Ethiopia. *The Journal of Agricultural Science* 160, 440–447. <https://doi.org/10.1017/S0021859622000624>.

Paulus, L.A.R., Pereira, Z.V., Arco-Verde, M.F., Line, J.D.B., Padovan, M.P., Santos, M.A.R. dos, 2021. Viabilidade financeira de arranjos agroflorestais biodiversos: estudo de casos no Mato Grosso do Sul, Brasil. *Research, Society and Development* 10, e370101016593–e370101016593. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i10.16593>.

Rezende, J.L.P. de, Oliveira, A.D. de, 2001. Análise econômica e social de projetos florestais - 3ª Edição. Editora UFV.

Rois-Díaz, M., Lovric, N., Lovric, M., Ferreiro-Domínguez, N., Mosquera-Losada, M.R., den Herder, M., Graves, A., Palma, J.H.N., Paulo, J.A., Pisanelli, A., Smith, J., Moreno,

G., García, S., Varga, A., Pantera, A., Mirck, J., Burgess, P., 2018. Farmers' reasoning behind the uptake of agroforestry practices: evidence from multiple case-studies across Europe. *Agroforest Syst* 92, 811–828. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0139-9>.

Sagastuy, M., Krause, T., 2019. Agroforestry as a Biodiversity Conservation Tool in the Atlantic Forest? Motivations and Limitations for Small-Scale Farmers to Implement Agroforestry Systems in North-Eastern Brazil. *Sustainability* 11, 6932. <https://doi.org/10.3390/su11246932>.

Salton, J.C., Mielniczuk, J., Bayer, C., Fabrício, A.C., Macedo, M.C.M., Broch, D.L., 2011. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. *Pesq. agropec. bras.* 46, 1349–1356. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000031>.

Santana, M. da S., Sampaio, E.V. de S.B., Giongo, V., Menezes, R.S.C., Jesus, K.N. de, Albuquerque, E.R.G.M. de, Nascimento, D.M. do, Pareyn, F.G.C., Cunha, T.J.F., Sampaio, R.M.B., Primo, D.C., 2019. Carbon and nitrogen stocks of soils under different land uses in Pernambuco state, Brazil. *Geoderma Regional* 16, e00205. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00205>.

Santos, D.F. dos, Campos, G., 2020. Viabilidade Econômico-Financeira para expansão da Cafeicultura em Unaí, Minas Gerais. *JPM - Journal of Perspectives in Management* 84–100. <https://doi.org/10.51359/2594-8040.2020.243646>.

Santos Martin, F., van Noordwijk, M., 2011. Is native timber tree intercropping an economically feasible alternative for smallholder farmers in the Philippines? *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 55, 257–272. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8489.2011.00530.x>.

Schulz, K., Voigt, K., Beusch, C., Almeida-Cortez, J.S., Kowarik, I., Walz, A., Cierjacks, A., 2016. Grazing deteriorates the soil carbon stocks of Caatinga forest ecosystems in Brazil. *Forest Ecology and Management* 367, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.02.011>.

Siegwart, L., Bertrand, I., Roupsard, O., Jourdan, C., 2023. Contribution of tree and crop roots to soil carbon stocks in a Sub-Saharan agroforestry parkland in Senegal. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 352, 108524. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108524>.

Siqueira, H.M. de, Senna, D.S. de, Araújo, J.B. da S., Silva, M.W. da, Turbay, E.R.M.G., 2020. Análise econômica de consórcios do cafeeiro conilon com espécies perenes e florestais no sul do espírito santos. *Revista Brasileira de Agroecologia* 15, 14–14. <https://doi.org/10.33240/rba.v15i5.23125>.

Soil Survey Staff, 2014. *Keys to Soil Taxonomy* | Natural Resources Conservation Service. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.

Tonucci, R.G., Vogado, R.F., Silva, R.D., Pompeu, R.C.F.F., Oda-Souza, M., Souza, H.A. de, 2023. Agroforestry system improves soil carbon and nitrogen stocks in depth after land-use changes in the Brazilian semi-arid region. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 47, e0220124. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20220124>.

Trove Research, 2021. Future Demand, Supply and Prices for Voluntary Carbon Credits – Keeping the Balance.

Tumwebaze, S.B., Byakagaba, P., 2016. Soil organic carbon stocks under coffee agroforestry systems and coffee monoculture in Uganda. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 216, 188–193. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.037>.

Waldén, P., Ollikainen, M., Kahiluoto, H., 2020. Carbon revenue in the profitability of agroforestry relative to monocultures. *Agroforest Syst* 94, 15–28. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00355-x>.

Zaro, G.C., Caramori, P.H., Yada Junior, G.M., Sanquetta, C.R., Filho, A.A., Nunes, A.L.P., Prete, C.E.C., Voroney, P., 2020. Carbon sequestration in an agroforestry system of coffee with rubber trees compared to open-grown coffee in southern Brazil. *Agroforest Syst* 94, 799–809. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00450-z>.

Zomer, R.J., Bossio, D.A., Trabucco, A., Noordwijk, M. van, Xu, J., Zomer, R.J., Bossio, D.A., Trabucco, A., Noordwijk, M. van, Xu, J., 2022. Global carbon sequestration potential of agroforestry and increased tree cover on agricultural land. *C* 2, 1–10. <https://doi.org/10.48130/CAS-2022-0003>.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo corroboram a hipótese de que os sistemas de cultivo de café, particularmente os sistemas agroflorestais biodiversos, exercem um efeito positivo no acúmulo de carbono no solo, na diversidade da macrofauna edáfica e na formação de agregados do solo.

No que diz respeito à valoração econômica, a hipótese foi confirmada, já que os sistemas de café estudados demonstraram ser economicamente viáveis, com uma receita que superou os custos. Portanto, esses resultados destacam a importância dos sistemas agroflorestais como uma estratégia sustentável e rentável para a produção de café, tanto em termos ambientais quanto econômicos.

4. ANEXOS

ANEXO A

Tabela 8 - Densidade (número de indivíduos m⁻²), riqueza (número de grandes grupos taxonômicos) e índices de diversidade da macrofauna edáfica em sistema agroflorestal de café e floresta nativa.

Grupo Taxonômico	CF	SAF-MB	SAF-SPM	SAF-BMG	FN
Araneae	20,00	12,00	80,00	40,00	16,00
Archaeognatha	4,00	4,00	12,00	8,00	8,00
Blattodea	4,00	16,00	4,00	8,00	8,00
Chilopoda	0,00	0,00	0,00	4,00	0,00
Coleoptera	28,00	12,00	32,00	16,00	24,00
Coleoptera larva	4,00	20,00	16,00	16,00	44,00
Dermaptera	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00
Diplopoda	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00
Diptera	0,00	0,00	0,00	4,00	4,00
Entomobryomorpha	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00
Formicidae	20,00	92,00	348,00	44,00	88,00
Gastropoda	4,00	36,00	12,00	0,00	0,00
Hemiptera	0,00	8,00	4,00	40,00	0,00
Heteroptera	0,00	0,00	8,00	0,00	4,00
Hymenoptera	0,00	0,00	12,00	4,00	0,00
Isopoda	36,00	24,00 a	116,00	0,00	60,00
Isopoda larva	44,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Isoptera	48,00	68,00	16,00	196,00	32,00
Lepidoptera larva	8,00	4,00	16,00	8,00	20,00
Lepidoptera	0,00	0,00	0,00	4,00	0,00
Mantodea	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Neuroptera	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00
Oligochaeta	80,00	332,00	120,00	252,00	92,00
Orthoptera	0,00	8,00	0,00	0,00	0,00
Psocoptera	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00
Thysanura	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00
Trichoptera larva	4,00	0,00	12,00	16,00	4,00
Densidade (Ind.m ⁻²)	308	644	824	668	408
Riqueza média	7 b	8,75	10	8,75	8,25
Riqueza total	14,0	15	18,0	17,0	14,0
H'	3,14	2,49	2,80	2,68	3,12
J	0,82	0,64	0,67	0,65	0,82

H' – Índice de Shannon; J – índice de equitabilidade de Pielou. Letras iguais na linha que comparam os sistemas não diferem entre si pelo teste Kruskal Wallis a 5% de significância.