

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOLOGIA
MESTRADO PROFISSIONAL

JOANA RODAS ALVES

**SEQUESTRO DE CARBONO EM UM SISTEMA AGROFLORESTAL, SISTEMAS
AGRÍCOLAS E FRAGMENTO FLORESTAL EM LATOSSOLO FRANCO-ARENO**

Maringá-PR

2025

JOANA RODAS ALVES

**SEQUESTRO DE CARBONO EM UM SISTEMA AGROFLORESTAL, SISTEMAS
AGRÍCOLAS E FRAGMENTO FLORESTAL EM LATOSSOLO FRANCO-ARENO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, Mestrado Profissional, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agroecologia.

Orientador(a): Prof. Dr. José Ozinaldo Alves de Sena

Coorientador(a): Prof.(a) Dr.(a): Luis Cláudio Maranhão Froufe

Maringá-PR

2025

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

A474s

Alves, Joana Rodas

Sequestro de carbono em um sistema agroflorestal, sistemas agrícolas e fragmento florestal em latossolo franco-areno / Joana Rodas Alves. -- Maringá, PR, 2025.
89 f. : il. color., figs., tabs., mapas

Orientador: Prof. Dr. José Ozinaldo Alves de Sena.

Coorientador: Prof. Dr. Luis Cláudio Maranhão Froufe.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Agroecologia - Mestrado Profissional, 2025.

1. Carbono. 2. Mudanças climáticas. 3. Serapilheira. 4. Biomassa aérea. I. Ozinaldo Alves de Sena, José, orient. II. Froufe, Luis Cláudio Maranhão, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Agrárias. Departamento de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Agroecologia - Mestrado Profissional. IV. Título.

CDD 23.ed. 551.6

Elaine Cristina Soares Lira - CRB-9/1202

JOANA RODAS ALVES

**SEQUESTRO DE CARBONO EM UM SISTEMA AGROFLORESTAL, SISTEMAS
AGRÍCOLAS E FRAGMENTO DE FLORESTA EM LATOSSOLO FRANCO-
ARENOSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agroecologia - Mestrado Profissional – PROFAGROEC, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências, para obtenção do título de Mestre em Agroecologia.

Prof. Dr. Higo Forlan Amaral
(Universidade Estadual de Maringá - PROFAGROEC)

Prof. Dr. Luis Claudio Maranhão Froufe
(Embrapa Florestas)

Prof. Dr. Paulo Agenor Alves Bueno
(UTFPR – Campo Mourão)

Prof. Dr. José Ozinaldo Alves de Sena
(Universidade Estadual de Maringá - PROFAGROEC) (Orientador)

APROVADO em 06 de junho de 2025.

Dedico este trabalho a todos aqueles que
contribuíram para sua realização.

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação só foi possível graças ao apoio de muitas pessoas e instituições que me acompanharam ao longo desta trajetória.

Agradeço ao meu orientador, professor José Ozinaldo, e coorientador, professor Luiz Froufe, pela orientação científica e apoio em todas as etapas da pesquisa. Aos colegas de campo e ao professor Higo, pelo suporte técnico e estatístico. Ao Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, Mestrado Profissional, da Universidade Estadual de Maringá, pelo ensino de excelência e apoio institucional.

Agradeço à minha mãe, pelo incentivo e contribuição direta no texto, e ao meu pai, pelo apoio incondicional. Ao Lucas, pela paciência, compreensão e suporte constante. À minha família e amigos, pela motivação e carinho em todos os momentos.

Agradeço especialmente, ao meu filho, Joaquim, minha maior inspiração e força diária. E dedico este trabalho à memória da minha avó Hilda, cuja presença continua viva em cada decisão do meu caminho.

A todos, meu sincero e profundo agradecimento.

*Portanto Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas.
A Ele seja a glória perpetuamente! Amém.*

(Romanos, 11:36)

RESUMO

Este estudo teve objetivo de estimar o estoque de carbono em diferentes compartimentos da biomassa — serapilheira, biomassa viva arbórea e biomassa viva arbustiva com Circunferência à altura do peito (CAP) < 15 cm — em quatro sistemas de uso do solo: monocultivo, pastagem, sistema agroflorestal (SAF) e fragmento florestal secundário, localizados em Latossolo Vermelho distrófico de textura franco arenosa, típico da Formação Caiuá, no bioma Mata Atlântica, na Fazenda Experimental de Iguatemi (FEI), em Maringá – PR. A metodologia envolveu o levantamento fitossociológico em parcelas de 100 m², coleta e quantificação da biomassa aérea por equações alométricas, além da análise de serapilheira fracionada em folhas, estrutura lenhosa e estrutura reprodutiva. Os resultados demonstraram que o maior estoque total de carbono foi observado na Floresta Secundária (69,42 Mg C ha⁻¹), seguida pelo SAF (28,37 Mg C ha⁻¹), com acúmulo majoritariamente na biomassa morta. A pastagem e o monocultivo apresentaram os menores valores (1,81 e 1,35 Mg C ha⁻¹, respectivamente), refletindo a menor complexidade estrutural desses sistemas. Além disso, os sistemas mais biodiversos, como o SAF e o fragmento florestal, exibiram maior estabilidade nos dados, resultado atribuído à maior complexidade estrutural e funcional desses ambientes, que favorece a resiliência ecológica. Esses sistemas também apresentaram índices ecológicos superiores, com destaque para o Índice de Diversidade de Shannon (H') e o Índice de Valor de Importância (IVI), reforçando a importância dos sistemas agroflorestais como alternativa agroecológica para o sequestro de carbono e a conservação dos serviços ecossistêmicos. Os achados confirmam o papel relevante dos sistemas florestais e agroflorestais na mitigação das mudanças climáticas e indicam caminhos para políticas públicas voltadas à agricultura sustentável.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; serapilheira; biomassa aérea.

ABSTRACT

This study aimed to estimate carbon stocks in different biomass compartments – litter, live tree biomass, and live shrub biomass with a circumference at breast height (CBH) < 15 cm – in four land-use systems: monoculture, pasture, agroforestry system (AFS), and secondary forest fragment, located in dystrophic Red Latosol with sandy loam texture, typical of the Caiuá Formation, in the Atlantic Forest biome, at the Iguatemi Experimental Farm (FEI) in Maringá, Paraná, Brazil. The methodology involved a phytosociological survey in 100 m² plots, collection and quantification of aboveground biomass through allometric equations, and litter analysis fractionated into leaves, woody structure, and reproductive structure. The results showed that the highest total carbon stock was observed in the Secondary Forest (69.42 Mg C ha⁻¹), followed by the AFS (28.37 Mg C ha⁻¹), with accumulation primarily in dead biomass. Pasture and monoculture presented the lowest values (1.81 and 1.35 Mg C ha⁻¹, respectively), reflecting the lower structural complexity of these systems. Furthermore, more biodiverse systems, such as the AFS and forest fragment, exhibited greater stability in the data, a result attributed to the higher structural and functional complexity of these environments, which favors ecological resilience. These systems also presented higher ecological indices, particularly the Shannon Diversity Index (H') and the Importance Value Index (IVI), reinforcing the importance of agroforestry systems as an agroecological alternative for carbon sequestration and the conservation of ecosystem services. The findings confirm the relevant role of forest and agroforestry systems in mitigating climate change and point toward pathways for public policies aimed at sustainable agriculture.

Keywords: Climate change; litter; aboveground biomass.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Estatísticas Descritivas Detalhadas da Biomassa Morta (FF – Fragmento Florestal; MONO – Monocultura; PT – Pastagem; SAF – Sistema Agroflorestal	45
Tabela 2- Matriz de Comparações de Tukey (Teste HSD)	49
Tabela 3- Estatísticas Descritivas Detalhadas da Biomassa VivaMorta (FF – Fragmento Florestal; MONO – Monocultura; PT – Pastagem; SAF – Sistema Agroflorestal	52
Tabela 4- Matriz de Comparações de Tukey (Teste HSD)	58
Tabela 5- Espécies amostradas no SAF.....	62
Tabela 6- Espécies amostradas no Fragmento florestal	63
Tabela 7- Estoque de carbono por tratamento, considerando os compartimentos de biomassa morta e biomassa viva, com valores expressos em Mg C ha^{-1}	65
Tabela 8- Média de carbono por tratamento, considerando os compartimentos de biomassa morta e biomassa viva, a média por tratamento, com valores expressos em Mg C ha^{-1}	66
Tabela 9- Carbono na serapilheira (Mg C ha^{-1}) em diferentes sistemas de uso do solo, conforme dados deste estudo e de referências da literatura.....	69
Tabela 10- Estoque de Carbono por Fração da Biomassa.	70
Tabela 11- Estimativas do estoque de carbono na biomassa aérea viva (em Mg C ha^{-1}) nos diferentes sistemas de uso do solo, calculadas com base nas equações alométricas propostas por Arévalo et al. (2002).	73
Tabela 12- Estoque total de carbono por uso do solo, considerando os compartimentos de biomassa morta, biomassa viva e biomassa viva aérea. (Valores expressos em Mg C ha^{-1}).....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa de localização da FEI	34
Figura 2- Imagem panorâmica da FEI	35
Figura 3- SAF intensivo em 2024.	36
Figura 4- Área de pastagem.	36
Figura 5- Área de Mata nativa.	36
Figura 6- Área de monocultura.	37
Figura 7- Dimensionamento das linhas do SAF contendo chichá, eucalipto, moringa, bananeira e frutíferas (acerola/manga/citros/abacate).	37
Figura 8- Dimensionamento das linhas de café e moringa.....	38
Figura 9- Parcelas de 10x10 demarcadas em cada área para coleta de dados.....	39
Figura 10- Delimitação de parcelas para amostragem.	41
Figura 11- Gabarito utilizado para coleta de serapilheira.	41
Figura 12- Material armazenado em sacola de papel.....	42
Figura 13- Material armazenado e etiquetado.	42
Figura 14- Somas e Médias de biomassa morta nas áreas de estudo.....	46
Figura 15- Distribuição da Biomassa por Área (Boxplot).....	47
Figura 16- Intervalos de confiança das diferenças entre médias (Tukey HSD).	50
Figura 17- Agrupamentos e Gradiente de Complexidade.	51
Figura 18- Somas e médias de Biomassa Viva (Mg Ha)	54
Figura 19- Distribuição da Biomassa viva por área (Boxplot).	55
Figura 20- Intervalos de confiança das diferenças entre médias (Tukey HSD).	59
Figura 21- Agrupamentos e Gradiente de Complexidade.	60
Figura 22- Estoque de carbono por tratamento, considerando os compartimentos de biomassa morta e biomassa viva, com valores expressos em Mg C ha ⁻¹	66
Figura 23- Estoque médio de carbono (Mg C ha ⁻¹) por sistema de uso do solo	67
Figura 24- Estoque de carbono por tratamento, considerando os compartimentos de biomassa morta e biomassa viva, com valores expressos em Mg C ha ⁻¹	71
Figura 25- Comparação entre o estoque total de carbono (Mg C) obtido na área amostrada (0,04 ha) e o estoque estimado por hectare (Mg C ha ⁻¹) nos sistemas Floresta e SAF.	72
Figura 26- Estoque total de carbono por compartimento e sistema de uso do solo.	77

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo geral.....	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	DESENVOLVIMENTO X SUSTENTABILIDADE	15
2.2	BIODIVERSIDADE, NICHOS ECOLÓGICO E SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS	16
2.3	AGRICULTURA: PRODUÇÃO, CONSEQUÊNCIAS E DESAFIOS	18
2.4	MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A AGRICULTURA.....	20
2.5	CARBONO: A AMBIVALENCIA NA CRISE CLIMÁTICA.....	22
2.6	CARBONO NO AMBIENTE	24
2.7	BIOMASSA VEGETAL, SERAPILHEIRA, FLUXO DE CARBONO E USO DO SOLO	26
2.8	SISTEMAS AGROFLORESTAIS: UMA ESTRATÉGIA DE MITIGAÇÃO PARA AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	29
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	34
3.1	COLETA DE DADOS	39
3.2	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	ANÁLISE DA BIOMASSA MORTA.....	45
4.1.1	Estatísticas Descritivas	45
4.1.2	Análise do Teste ANOVA e Interpretação Estatística da Biomassa morta	47
4.1.3	Resultados do Teste ANOVA	47
4.1.4	Componentes da Variância e Consistência	48
4.1.5	Magnitude do Efeito	48
4.1.6	Homogeneidade de Variância – Teste de Levene	48
4.1.7	Teste de Tukey – Comparações Múltiplas.....	48
4.1.8	Agrupamentos e Gradiente de Complexidade	50
4.2	ANÁLISE DA BIOMASSA VIVA	52
4.2.1	Estatísticas Descritivas	52

4.2.2	Análise do Teste ANOVA e Interpretação Estatística da Biomassa Viva.....	55
4.2.3	Componentes da Variância e Consistência	56
4.2.4	Magnitude do Efeito	57
4.2.5	Homogeneidade de Variância – Teste de Levene	57
4.2.6	Teste de Tukey – Comparações Múltiplas.....	57
4.2.7	Agrupamentos e Gradiente de Complexidade	59
4.3	PARÂMETROS FITOSSOCIOLOGICOS E DIVERSIDADE	61
4.4	CARBONO NA SERAPILHEIRA E BIOMASSA VIVA ARBUSTIVA.....	64
4.5	CARBONO NA BIOMASSA VIVA AÉREA	71
4.6	SOMA DO CARBONO	75
5	CONCLUSÃO.....	80
	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

A intensificação das atividades agropecuárias e a consequente alteração no uso da terra têm promovido impactos significativos sobre os ecossistemas naturais, contribuindo para o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), a degradação do solo e a perda de biodiversidade (CARVALHO, 2010; IPCC, 2022). Tais transformações comprometem a capacidade dos sistemas agrícolas de prover serviços ecossistêmicos essenciais, como a regulação climática, a ciclagem de nutrientes e o sequestro de carbono (MARQUES et al., 2011; BERTRAND, 1971).

Nesse contexto, alternativas sustentáveis de uso da terra, como os sistemas agroflorestais (SAFs), têm se destacado enquanto estratégias eficazes na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, contribuindo para o sequestro de carbono e a manutenção da biodiversidade (MONTAGNINI; NAIR, 2004; PALMA et al., 2018). A adoção de práticas que conciliam produção agrícola e conservação ambiental é, portanto, estratégica em contextos de transição para uma agricultura de base ecológica (ALTIERI, 2009).

A valorização dos serviços ecossistêmicos prestados por esses sistemas, ainda que muitas vezes não remunerados pelo mercado, é fundamental para garantir a sustentabilidade ambiental e o bem-estar humano (COSTA; OLIVEIRA, 2013; ARCOVERDE; AMARO, 2015). Os SAFs integram espécies arbóreas, culturas agrícolas e, por vezes, pastagens em um mesmo espaço, promovendo maior estabilidade ecológica, resiliência e potencial de acúmulo de carbono na biomassa e no solo (PALUDO; COSTABEBER, 2012; PRIMIERI et al., 2017). Compreender a dinâmica do carbono em diferentes sistemas de uso do solo é essencial para subsidiar estratégias de mitigação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e nortear políticas públicas voltadas à agricultura sustentável.

Diante disso, esta pesquisa tem como objetivo principal estimar o estoque de carbono na biomassa aérea viva (arbórea) e na serapilheira em quatro sistemas de uso do solo: monocultivo, pastagem, SAF e fragmento florestal secundário. A hipótese considera que sistemas mais biodiversos apresentam maior acúmulo de carbono e maior estabilidade ecológica em relação aos sistemas simplificados. Para tanto, foram realizados levantamentos fitossociológicos e coletas de serapilheira em parcelas nos quatro sistemas na FEI, com posterior análise por meio de equações alométricas e índices ecológicos, como o Índice de Diversidade de Shannon (H') e o Índice de Valor

de Importância (IVI). Com base nos dados obtidos, busca-se contribuir para a consolidação científica dos SAFs como alternativas eficazes de sequestro de carbono e de conservação dos serviços ecossistêmicos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Estimar o estoque de carbono em diferentes compartimentos da biomassa aérea – serapilheira, biomassa viva arbórea com CAP > 15 cm – em quatro sistemas de uso do solo (monocultivo, pastagem, sistema agroflorestal e fragmento florestal secundário) localizados na Fazenda Experimental de Iguatemi (FEI), em Maringá – PR.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar um levantamento fitossociológico da vegetação presente nos sistemas avaliados.
- Quantificar a biomassa aérea viva arbórea por meio de equações alométricas.
- Determinar a massa seca da serapilheira e separá-la em seus compartimentos (folhas, estrutura lenhosa e estrutura reprodutiva).
- Calcular o estoque de carbono em cada compartimento de biomassa dos sistemas analisados.
- Comparar os diferentes sistemas quanto à capacidade de armazenamento de carbono.
- Contribuir com subsídios técnicos e científicos para a formulação de políticas públicas de mitigação das mudanças climáticas no meio rural.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 DESENVOLVIMENTO X SUSTENTABILIDADE

O conceito de desenvolvimento sustentável teve sua origem na década de 1970, com o nome de ecodesenvolvimento, representando uma tentativa de conciliar o crescimento econômico com a preservação ambiental e a melhoria das condições sociais (ROMEIRO, 2012). Em contraste com as visões da época, que oscilavam entre o crescimento econômico ilimitado e a estagnação total para preservar os recursos naturais, o ecodesenvolvimento propunha uma abordagem equilibrada, que levasse em conta a necessidade de políticas públicas específicas para garantir inclusão social e eficiência ecológica.

A definição formal de desenvolvimento sustentável foi consolidada em 1987, por meio do “Relatório Brundtland”, que o descreveu como “aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias necessidades” (BRUNDTLAND, 1991, n.p).

No entanto, os desafios permanecem, especialmente em contextos de retrocessos, como as mudanças no Código Florestal brasileiro, que enfraqueceram a proteção ambiental; e as políticas negacionistas climáticas adotadas pelo Brasil em 2019 (MOREIRA et al., 2021; MIGUEL, 2020). Mesmo com compromissos internacionais, como a redução de 43% das emissões de gases de efeito estufa até 2030, firmada no Acordo de Paris (Conferência das partes), o equilíbrio entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental continua sendo um desafio central na busca por um futuro sustentável.

Em 2021, a ONU publicou um relatório descrito como “alerta vermelho para a humanidade”, devido à gravidade das evidências sobre as mudanças climáticas (ONU, 2021). Naquele mesmo ano, durante a COP-26, em Glasgow, o Brasil oficializou seu compromisso de alcançar a neutralidade de carbono até 2050, e aderiu à Declaração de Florestas, com a meta de zerar o desmatamento até 2030 (UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE, 2021). O país também assumiu o compromisso de reduzir as emissões de metano – um avanço importante, considerando seu papel como grande emissor desse gás, especialmente nos setores de agropecuária e resíduos. No entanto, o Brasil enfrentou um isolamento diplomático durante a COP-

26, devido à ocultação de dados sobre o desmatamento (HUGUENIN; MEIRELLES, 2022).

Já na COP-27, realizada em 2022, no Egito, o Brasil teve uma participação mais ativa, com representantes de diversos setores, incluindo autoridades governamentais, especialistas ambientais, ONGs e líderes indígenas. A conferência abordou temas como redução de emissões de gases de efeito estufa, incentivo a energias renováveis, proteção de ecossistemas, financiamento climático e adaptação às mudanças climáticas. Essas discussões reforçam a importância de uma ação global coordenada para enfrentar os desafios ambientais (HUGUENIN; MEIRELLES, 2022).

O desenvolvimento sustentável, portanto, deve ser compreendido em seus três pilares, o social, ambiental e econômico – de maneira a refletir e criar ações que promovam o avanço tecnológico, a preservação do meio ambiente e a melhoria das condições sociais (MIKHAILOVA, 2004).

2.2 BIODIVERSIDADE, NICHOS ECOLÓGICO E SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS

Os ecossistemas são sistemas complexos e, portanto, devem ser compreendidos de forma integrada, considerando tanto os fatores físicos, responsáveis pela formação dos habitats (fatores abióticos), quanto os organismos vivos (fatores bióticos) (TANSLEY, 1991). O estudo dos ecossistemas envolve a análise do fluxo de matéria e energia, bem como a influência do clima e de outros fatores físicos nesses processos. O funcionamento dos ecossistemas é reflexo das atividades dos organismos e das transformações físicas e químicas que ocorrem no solo, na atmosfera e na água (RICKLEFS, 2010), de modo que qualquer evento que cause alterações na biodiversidade pode afetar as condições dos ecossistemas e, consequentemente, seus processos e funcionalidades (BURKHARD; MAES, 2017).

Nesse contexto, a perda de biodiversidade configura um problema com consequências alarmantes. Um estudo realizado no município de Viçosa, no Ceará, no nordeste brasileiro, se utilizou de um modelo matemático baseado na relação espécie-área, para demonstrar que a perda de biodiversidade da Mata Atlântica já atingiu níveis extremos. A pesquisa, que levou em consideração a perda de espécies de aves, mamíferos e répteis, calculou um coeficiente de perda da biodiversidade (CPB) de 0,815 para o período de 1985 a 2014. A situação se torna ainda mais

preocupante, ao constatar que a velocidade e a aceleração da perda da biodiversidade aumentam à medida que o desmatamento avança (BRANCO, 2022).

O conceito de serviços ecossistêmicos refere-se à relação entre os ecossistemas e o bem-estar humano. Essa temática tem ganhado cada vez mais aceitação tanto no meio acadêmico quanto governamental, tornando-se essencial para a formulação de políticas ambientais atuais (BALVANERA; COTLER, 2007).

A literatura científica aponta para diversas definições de serviços ecossistêmicos (SE), sendo a mais recorrente aquela baseada no relatório da Avaliação Ecossistêmica do Milênio (MEA, 2005), que estabeleceu categorias para esses serviços. Apesar de variadas, todas as definições de serviços ecossistêmicos ressaltam a conexão entre os ecossistemas naturais e o bem-estar humano, em que os “serviços” atuam como ligação entre o mundo humano e o mundo natural (GROOT et al., 2017).

Diante disso, O MEA classificou os serviços ecossistêmicos em quatro categorias, todas sustentadas pela biodiversidade (TEEB, 2010):

- a. Serviços de provisão: alimentos, água, madeira e fibra;
- b. Serviços de regulação: regulação climática, purificação do ar, qualidade da água, polinização e proteção contra desastres (erosão, proteção costeira);
- c. Serviços culturais: recreação, saúde física e mental, valores espirituais e estéticos, turismo e educação;
- d. Serviços de suporte: formação do solo, fotossíntese, manutenção da diversidade genética e ciclagem de nutrientes. Atualmente, esta categoria é entendida como “processos ecossistêmicos”, e não como SE, já que serve de base para a provisão dos SE das outras categorias (DÍAZ et al., 2015).

Segundo Ricklefs (2010), a complexidade dos ecossistemas abrange a biocenose e o biótopo, nos quais os seres humanos são um dos elementos. Assim, tanto em ecossistemas naturais quanto em agroecossistemas (AE), as funções ecossistêmicas que os compõem, intrinsecamente, formam a estrutura fundamental que sustenta a vida (TURNER; DAILY, 2008). As funções ecossistêmicas referem-se à dinâmica do fluxo de energia e matéria entre os elementos bióticos e abióticos que compõem um ecossistema. Compreende processos como produção de biomassa, transferência trófica, ciclagem de nutrientes, dinâmica da água e transferência de calor (DÍAZ et al., 2015).

A fauna do solo, por exemplo, desempenha papel fundamental na manutenção de diversos serviços ecossistêmicos vitais. As minhocas atuam como verdadeiras "engenheiras do ecossistema", enriquecendo a fertilidade do solo ao escavar túneis que aumentam a aeração e a infiltração de água, além de decompor matéria orgânica e auxiliar na ciclagem de nutrientes. Cupins e formigas também se destacam, modificando a estrutura do solo através de suas atividades de construção de ninhos e galerias, impactando a disponibilidade de água e nutrientes. Já os besouros coprófagos, ao se alimentarem de excrementos, aceleram a decomposição e ciclagem de nutrientes, dispersam sementes e contribuem para o controle de parasitas (BROWN, 2015).

Um dos serviços que regulam as condições ambientais é a capacidade das florestas e do solo de fixar carbono do dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, exercendo um papel essencial na ciclagem do C, atuando como sumidouros naturais. Esse processo refere-se à taxa líquida de carbono atmosférico capturado e armazenado na biomassa vegetal, contribuindo para a desaceleração das mudanças climáticas (CARVALHO et al., 2010)

As plantas absorvem o C do CO_2 atmosférico por meio da fotossíntese. A fotossíntese é um processo bioquímico no qual organismos fotoautotróficos convertem a energia luminosa em energia química. Nesse processo, a energia proveniente da luz solar é utilizada para sintetizar compostos orgânicos a partir do CO_2 como fonte de carbono, a exemplo da glicose. Simultaneamente, a água atua como fonte de elétrons e hidrogênio, e é oxigenada durante a reação. Esse mecanismo é necessário para a manutenção da vida na Terra (MOREIRA, 2013).

Todas essas interações formam uma teia de relações ecológicas, da qual se originam os serviços ecossistêmicos essenciais que tornam a vida no planeta Terra possível, incluindo a produção de alimentos para as demais formas de vida.

2.3 AGRICULTURA: PRODUÇÃO, CONSEQUÊNCIAS E DESAFIOS

A produção agropecuária brasileira ocupa uma posição estratégica na economia do país, pois impulsiona o agronegócio e contribui para o crescimento econômico. Em 2017, o setor alcançou um crescimento de 13%, a maior taxa desde 1997. Com uma participação de 27% no Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio e 40% das exportações totais do país, a relevância deste setor é inegável (BRASIL,

2018). Apesar dos avanços produtivos, o setor enfrenta desafios estruturais, que abrangem aspectos econômicos e sociais (VIEIRA FILHO et al., 2019), além de questões ambientais que comprometem a sobrevivência do planeta tal como conhecemos. O modelo convencional de agricultura tem causado impactos consideráveis no meio rural, resultando no desmatamento de florestas, na fragmentação de ecossistemas e no uso indiscriminado de substâncias químicas.

Esse modelo de produção se desenvolveu a partir da década de 1960, através de um ciclo de inovações tecnológicas voltadas para o aumento da produtividade nos sistemas agrícolas brasileiros (MAZOYER; ROUDART, 2010). Esse ciclo pautou-se em investimentos de instituições privadas para a melhoria genética de sementes, na produção e incentivo ao uso de agrotóxicos (herbicidas, fungicidas e inseticidas) e fertilizantes pelas indústrias químicas (ANDRADES, 2007).

O desenvolvimento orientado por essa lógica busca o lucro imediato, favorecendo uma pequena parcela da sociedade e se revelando potencialmente excludente e destrutivo para o meio ambiente (MOTTER, 2010). Essa abordagem simplifica os ecossistemas em áreas de monocultura em larga escala, promovendo o uso intensivo de agrotóxicos e maquinário pesado, os quais contribuem diretamente para a degradação ambiental e, conseqüentemente, geram impactos negativos na biodiversidade (SILVA et al., 2012).

Além disso, o manejo inadequado e a utilização imprópria do solo são reconhecidos como fatores catalisadores dos passivos ambientais decorrentes da atividade agrícola. O desmatamento e a queima da vegetação, associados ao preparo convencional do solo, comprometem não apenas as propriedades do solo, mas também afetam os serviços ambientais, contribuindo significativamente para as alterações climáticas (BERNOUX et al., 2005; RANGEL; SILVA, 2007).

Nota-se o quanto a agricultura representa um setor estratégico para o desenvolvimento, mas enfrenta desafios relacionados ao uso intensivo de recursos naturais e práticas não sustentáveis. O modelo agrícola convencional, baseado na monocultura e no uso intensivo de agrotóxicos e fertilizantes, tem gerado conseqüências ambientais graves que podem ser irreversíveis.

2.4 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A AGRICULTURA

Conforme o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2019), o clima refere-se à “descrição estatística em termos da média e variabilidade” (p. 544) de variáveis, como temperatura e precipitação, “ao longo de um período de tempo que varia de meses a milhares ou milhões de anos”. Desse modo, o clima representa o “padrão de longo prazo” das condições atmosféricas. Nesse contexto, a mudança climática pode ser compreendida como

Uma alteração no estado do clima que pode ser identificada (por exemplo, usando testes estatísticos) por mudanças na média e, ou, na variabilidade de suas propriedades e que persiste por um período prolongado, normalmente décadas ou mais. As mudanças climáticas podem ser resultantes de processos internos naturais ou forçantes externos, como modulações dos ciclos solares, erupções vulcânicas, e mudanças antropogênicas persistentes na composição da atmosfera ou no uso do solo (IPCC, 2019, p. 544)

Segundo o relatório do IPCC (2019), desde o período pré-industrial, a temperatura do ar na superfície terrestre aumentou quase o dobro da média global. As alterações climáticas – que incluem aumento na frequência e intensidade de eventos extremos – têm tido impactos negativos significativos na segurança alimentar e nos ecossistemas terrestres, contribuindo também para a desertificação e degradação da terra em diversas regiões. Os dados disponíveis, desde 1961, indicam que o crescimento populacional global e as alterações nos padrões de consumo per capita de alimentos, ração animal, fibras, madeira e energia resultaram em níveis sem precedentes de uso da terra e de água doce. Atualmente, a agricultura é responsável por cerca de 70% do uso da água doce em todo o mundo.

A expansão das áreas destinadas à agricultura tem contribuído para o aumento das emissões líquidas de gases de efeito estufa, a perda de ecossistemas naturais, como florestas, savanas, campos naturais e áreas alagadas, e a diminuição da biodiversidade (IPCC, 2019). O relatório também discute como as atividades do setor de Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra (AFOLU) desempenham um papel significativo nas emissões mundiais de gases de efeito estufa (GEE). Entre 2007 e 2016, esse setor foi responsável por cerca de 13% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), 44% das emissões de metano (CH₄) e 81% das emissões de óxido nitroso (N₂O). Essas emissões, combinadas, representaram 23% do total de emissões

líquidas antrópicas de GEE no mundo, atingindo $12,0 \pm 2,9$ gigatoneladas de CO_2 equivalente por ano ($\text{GtCO}_2 \text{ eq ano}^{-1}$).

Quando as emissões relacionadas às atividades de pré-produção (como o uso de insumos agrícolas) e pós-produção (como o transporte e o processamento de alimentos) são incluídas dentro do sistema alimentar global, essas emissões totais sobem para um valor estimado de 37% do total das emissões líquidas antrópicas de GEE. Isso ressalta a importância do setor agrícola e da gestão da terra no contexto do combate às mudanças climáticas (IPCC, 2019).

Modelos globais estimam que as emissões líquidas de CO_2 derivadas do uso da terra e da mudança no uso da terra foram de aproximadamente $5,2 \pm 2,6$ gigatoneladas de CO_2 por ano ($\text{GtCO}_2 \text{ ano}^{-1}$) entre 2007 e 2016. Essas emissões são, em sua maior parte, atribuídas ao desmatamento, principalmente em áreas de florestas tropicais. Embora atividades como o reflorestamento e o florestamento tenham parcialmente compensado essas emissões, o saldo líquido permaneceu elevado, refletindo a contínua pressão sobre os ecossistemas naturais devido à conversão de terras para usos agrícolas e urbanos.

No mesmo período, as emissões globais de metano (CH_4) associadas ao setor de AFOLU atingiram 161 ± 43 milhões de toneladas de CH_4 por ano ($\text{MtCH}_4 \text{ ano}^{-1}$), o que equivale a cerca de $4,5 \pm 1,2 \text{ GtCO}_2 \text{ eq ano}^{-1}$. A concentração atmosférica de metano vem crescendo desde meados dos anos 1980, com um período de estabilidade entre 1999 e 2006, mas retornando a uma trajetória de aumento a partir de 2007. As principais fontes dessas emissões são biogênicas, ou seja, relacionadas à atividade biológica, incluindo a criação de ruminantes (bovinos, ovinos).

As emissões de óxido nitroso (N_2O) no setor AFOLU também apresentaram crescimento no período de 2007 a 2016, atingindo cerca de $8,7 \pm 2,5$ milhões de toneladas de N_2O por ano ($\text{MtN}_2\text{O ano}^{-1}$), aproximadamente $2,3 \pm 0,7 \text{ GtCO}_2 \text{ eq ano}^{-1}$. Essas emissões são frequentemente associadas à aplicação de fertilizantes nitrogenados na agricultura, em que o uso excessivo ou manejo inadequado das necessidades das culturas agrícolas resulta em ineficiências que aumentam as emissões de N_2O . Frente a isso, estima-se que os solos agrícolas são os responsáveis pela emissão de 3 milhões de toneladas de óxido nitroso (N_2O) por ano. Essa quantidade de N_2O equivale a cerca de 795 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO_2) em termos de potencial de aquecimento global.

Desde a era pré-industrial, as atividades humanas, especialmente o desmatamento e a agricultura intensiva, têm causado a liberação líquida de CO₂ para a atmosfera, contribuindo significativamente para o aquecimento global. O desmatamento não apenas libera CO₂ armazenado na biomassa, mas também reduz a capacidade dos ecossistemas de sequestrar carbono, agravando o efeito das mudanças climáticas (IPCC, 2019).

As mudanças climáticas têm causado uma série de impactos adversos, afetando a saúde pública, infraestrutura urbana, biodiversidade e produtividade agrícola, com consequências econômicas e sociais severas que tendem a se agravar com o aumento do aquecimento global (TOL, 2018).

As projeções indicam um aumento na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como ondas de calor e chuvas intensas, o que intensificará problemas como escassez de água, erosão do solo, perda de vegetação, incêndios florestais e redução na produtividade agrícola, especialmente em regiões tropicais. Além disso, níveis elevados de CO₂ atmosférico podem comprometer a qualidade nutricional das culturas (IPCC, 2019). O setor agropecuário, fortemente dependente das condições climáticas, é particularmente vulnerável às mudanças climáticas, uma vez que plantas e animais possuem limites de tolerância ao estresse térmico e à variação na precipitação, resultando em perdas de produtividade e renda agrícola (TOL, 2018). A agricultura familiar, em razão de sua menor capacidade de adaptação financeira e seu limitado acesso a políticas públicas, é ainda mais afetada por esses fenômenos.

Assim, a agricultura desempenha um papel duplo nas mudanças climáticas, tanto como emissora de gases de efeito estufa quanto como vítima de seus impactos. Essa inter-relação entre agricultura e mudanças climáticas exige a criação de políticas públicas robustas para mitigação e adaptação, a fim de reduzir os riscos climáticos e promover uma produção sustentável (IPCC, 2019).

2.5 CARBONO: A AMBIVALÊNCIA NA CRISE CLIMÁTICA

O C é um elemento químico presente em abundância na natureza, considerado a base fundamental da vida. Sua versatilidade e capacidade de formar uma ampla variedade de compostos orgânicos o tornam essencial para a existência e funcionamento dos organismos vivos. Desde sua descoberta e descrição por Antoine

Lavoisier em 1779, o carbono tem sido objeto de intenso estudo e investigação científica.

Diferentes fontes contribuem para a emissão de carbono na atmosfera, seja por processos naturais ou por atividades humanas. Vulcões liberam cerca de 2 gigatoneladas (Gt) de carbono. A respiração de animais, fungos e bactérias são responsáveis pela emissão de aproximadamente 35 Gt. No entanto, equilibrando essa equação entre emissão e sequestro de carbono, as algas nos oceanos e as plantas juntas conseguem sequestrar cerca de 40 Gt de carbono por ano (RICKLEFS, 2003).

Segundo Ricklefs (2003), durante a Era Paleozoica, entre 550 e 400 milhões de anos atrás, a atmosfera continha concentrações de CO_2 de 15 a 20 vezes maiores do que as atuais. Após múltiplos ciclos de aquecimento e resfriamento, o planeta atingiu níveis de CO_2 semelhantes aos de hoje apenas no final da Era Mesozoica, entre 241 e 65 milhões de anos. O ciclo natural do carbono, que captura CO_2 da atmosfera, foi responsável por esse equilíbrio ao longo do tempo, principalmente por meio da formação de florestas e da sedimentação nos oceanos. Dessa forma, o efeito estufa – um fenômeno natural – foi equilibrado, mantendo as condições climáticas estáveis ao longo dos milênios.

As interações humanas entre os indivíduos e com o meio ambiente, têm provocado transformações substanciais no clima da Terra. As emissões de GEE, sobretudo após o processo de industrialização global, foram – e ainda são – identificadas como o principal fator responsável por essas transformações (SCHMIDT et al., 2018). O desmatamento, por sua vez, exerce uma influência direta sobre o efeito estufa, uma vez que as florestas tropicais armazenam grandes quantidades de C, desempenhando um papel essencial no controle e na mitigação dos efeitos do aquecimento global (SAMPAIO et al., 2023).

Nesse cenário, surge a seguinte questão: o problema realmente reside no elemento carbono? Compreender o ciclo do C e as diferentes intervenções que podem ser realizadas em seus processos é fundamental para o desenvolvimento de estratégias abrangentes de mitigação das mudanças climáticas, além de ações coletivas e políticas sustentáveis.

2.6 CARBONO NO AMBIENTE

A importância do tema relacionado à matéria orgânica no solo (MOS), à dinâmica e reatividade do C no solo, aos aspectos estruturais da MOS e a outros fatores que regulam os teores de C no solo tem crescido consideravelmente. Isso ocorre, entre outros fatores, em razão da capacidade do solo de sequestrar carbono e mitigar as emissões antropogênicas de gases do efeito estufa. Iniciativas de painéis e associações internacionais, como o IPCC (COP/ONU), *Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases* (GRA), “4 per 1000 initiative” e outras ações globais, têm justificado o renovado interesse pelo carbono ao longo de mais de uma década (MARTIN-NETO et al., 2023).

Os oceanos representam o principal reservatório de carbono (C) no planeta, somados aos depósitos encontrados em formações geológicas (BRADY; WEIL, 2009). Os ecossistemas terrestres desempenham um papel essencial no ciclo global do carbono, pois a vegetação absorve CO₂ da atmosfera por meio do processo de fotossíntese. O C é armazenado na biomassa vegetal, incluindo as folhas, que, ao atingirem o estágio de senescência e caírem, formam a serapilheira – uma das principais fontes de carbono orgânico no solo, pois, ao se decompor, parte do material é incorporada ao solo na forma de húmus, contribuindo para o armazenamento de carbono em longo prazo.

As florestas são responsáveis por desempenhar um papel fundamental no fornecimento de estruturas vegetais que compõem a serapilheira acumulada, cuja quantidade é influenciada por diversos fatores ambientais e biológicos. Entre os principais fatores, destacam-se as variáveis climáticas, como precipitação e temperatura; a disponibilidade de nutrientes no solo; a característica genética das espécies vegetais; a idade e a densidade de plantio (CORREIA; ANDRADE, 1999).

A vegetação é o principal fator que determina a variabilidade horizontal da serapilheira, enquanto a taxa de decomposição influencia sua heterogeneidade vertical, resultando em diferentes espessuras a depender do ecossistema. Em locais com baixa taxa de decomposição, o acúmulo de serapilheira pode ser substancial (CORREIA; ANDRADE, 1999). Esse acúmulo está relacionado tanto à quantidade de material vegetal depositado pela parte aérea das plantas, quanto à taxa em que esse material é decomposto.

O processo de decomposição da serapilheira é dinâmico e envolve a fragmentação física das estruturas vegetais, transformações químicas, síntese de novos compostos e a transferência desses produtos para camadas mais profundas da manta orgânica ou do solo (HEAL et al., 1997). Esse processo sofre influência da composição da comunidade decompositora (macro e microrganismos), da qualidade do material orgânico e das condições físico-químicas do ambiente, que, por sua vez, são moduladas pelas características edafoclimáticas.

Componentes como lignina, polifenóis e celulose, presentes em altos teores, estão associados a taxas mais baixas de decomposição, menor liberação de nutrientes e maior acúmulo de serapilheira (SWIFT et al., 1979). Assim, as características edafoclimáticas e a composição do material orgânico auxiliam de forma essencial na dinâmica de formação e decomposição da serapilheira nos ecossistemas florestais.

O solo atua como um reservatório temporário de carbono. O estoque global de carbono no solo é de 2.500 gigatoneladas (Gt), que inclui cerca de 1.550 Gt de carbono orgânico do solo (SOC) e 950 Gt de carbono inorgânico do solo (SIC). O estoque de carbono no solo é 3,3 vezes maior que o tamanho do estoque atmosférico (760 Gt) e 4,5 vezes maior que o tamanho do estoque biótico (560 Gt) (LAL, 2004). De acordo com Machado (2005), os processos que desempenham um papel importante no sequestro de carbono nos solos incluem a humificação, agregação e sedimentação. Geralmente, observa-se que as concentrações de carbono são mais elevadas nas camadas superficiais, diminuindo exponencialmente à medida que a profundidade aumenta (MACHADO, 2005).

Já os processos que contribuem para a perda de carbono no solo envolvem erosão, decomposição, volatilização e lixiviação (LAL, 2004). Nesse sentido, o manejo eficiente dos resíduos vegetais contribui para a otimização da ciclagem de nutrientes e promove a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. A preservação dos ecossistemas agrícolas depende, sobretudo, da deposição e decomposição da serapilheira (CHAGAS et al., 2007).

Uma das estratégias para abordar os problemas decorrentes das emissões de GEE é o controle ativo dessas emissões (LE QUÉRE et al., 2018). Além disso, a implementação de medidas compensatórias, como o aumento do estoque de C nos ecossistemas terrestres, surge como uma alternativa viável (PRIMIERY et al., 2017). A preservação de florestas nativas, o reflorestamento, a adoção de sistemas

integrados de lavoura, pecuária e floresta, juntamente com o manejo adequado de pastagens e agricultura, são meios eficazes para aumentar esse estoque de carbono (COOK et al., 2014; VICENTE et al., 2019; MAGALHÃES et al., 2016). Essas medidas têm o potencial de retirar grandes quantidades de CO₂ da atmosfera por meio do processo de fotossíntese (CASSOL et al., 2019), além de armazenar esse carbono na biomassa aérea, subterrânea e no solo (ZELARAYÁN et al., 2015). Ademais, a matéria orgânica do solo (MO) exerce funções na estruturação dos sistemas agrícolas e no crescimento das plantas, influenciando os processos físicos, químicos e biológicos do solo.

Caracterizada como um sistema complexo de substâncias, sua dinâmica é moldada pela introdução contínua de resíduos orgânicos de diversas origens. Esses resíduos estão sujeitos a transformações constantes (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). A matéria orgânica pode interagir com outros componentes, afetando a retenção de água no solo (BEUTLER et al., 2002), a formação de agregados (SALTON et al., 2008), a densidade do solo (COSTA et al., 2006), o pH, a capacidade de troca catiônica (CIOTTA et al., 2003), a disponibilidade de nutrientes para as plantas, a infiltração e a aeração (SOUZA et al., 2004) e a atividade microbiana (D'ANDRÉA et al., 2004).

O C constitui, em termos quantitativos, a fração mais significativa da matéria orgânica (MO). As flutuações nos níveis de C no solo têm sido empregadas na análise da qualidade do solo, pois influenciam as propriedades determinantes da fertilidade do solo, além de exercerem uma função na capacidade de aumentar ou reduzir as emissões de GEE (BERNOUX et al., 2002; RESCK et al., 2008).

Diante desse contexto, a estimativa do C armazenado na serapilheira é de grande relevância, uma vez que permite compreender o papel desse material no sequestro de carbono e na contribuição para a mitigação das emissões de GEE.

2.7 BIOMASSA VEGETAL, SERAPILHEIRA, FLUXO DE CARBONO E USO DO SOLO

A substituição de um ecossistema por outro pode ocorrer de forma natural ou por intervenção humana, especialmente no tocante ao cultivo de alimentos (GUO; GIFFORD, 2002). De acordo com Carvalho et al. (2010), a alteração no uso da terra, além de provocar mudanças na cobertura do solo, está associada às variações no EC

no solo. Cerri et al. (2006) confirmam que mudanças no uso e ocupação da terra levam a desequilíbrios na dinâmica do ecossistema, porque as entradas de matéria orgânica se tornam menores que as saídas.

A restauração de áreas desmatadas é essencial tanto para aumentar o EC quanto para conservar a biodiversidade, especialmente na Mata Atlântica. A análise da biomassa aérea e da serapilheira, a partir de modelos matemáticos derivados de inventários florestais, tem sido utilizada para compreender a capacidade de sequestro de carbono, podendo impulsionar a preservação e a recuperação de áreas degradadas. Um estudo realizado na Reserva Ecológica de Guapiaçu (RJ) evidenciou que áreas reflorestadas com espécies nativas contribuem para o aumento do estoque de carbono, com um incremento proporcional à idade dos plantios. Foram avaliados reflorestamentos de 3, 5 e 7 anos, comparando-os com uma área de floresta nativa. O aumento da biomassa aérea e do estoque de carbono foi observado ao passo que os reflorestamentos envelheciam, sendo a biomassa aérea e o carbono na serapilheira mais elevados nas áreas mais maduras (AZEVEDO et al., 2018).

A serapilheira, produzida pela vegetação, possui uma função essencial no fluxo de carbono entre o meio físico e o biótico, conferindo maior estabilidade ao ecossistema. Sua produção varia conforme o estágio sucessional da vegetação (OLIVEIRA, 1997); em ecossistemas tropicais com vegetação arbórea, como os SAFs, há uma produção constante de serapilheira ao longo do ano (WERNECK et al., 2001), sendo que a quantidade gerada em diferentes períodos depende do tipo de sistema implementado (LEITÃO-FILHO et al., 1993). As taxas de produção de serapilheira podem ser afetadas pelo tamanho da vegetação que compõe o ecossistema (SONGWE et al., 1988), e variar dentro de uma mesma vegetação, dependendo do nível de perturbação e das práticas de manejo adotadas, além de fatores como a quantidade de chuva e as estações do ano (MARTINS; RODRIGUES, 1999).

Freitas et al. (2016) avaliaram o impacto de diferentes sistemas de manejo da agricultura familiar no EC no solo, na quantidade e qualidade da serapilheira acumulada na Amazônia. Foram avaliados quatro sistemas: sistema agroflorestal (SAF), pastagem cultivada (PA), roça de toco (RT) e mata nativa (MA). Os resultados demonstraram que o SAF se equiparou à MA em termos de estoque de serapilheira, nutrientes na massa seca e carbono estocado no solo, superando os sistemas PA e RT. A qualidade da serapilheira do SAF também se destacou, apresentando um tempo de meia-vida mais longo no solo, o que contribui para a mitigação do efeito estufa. Por

outro lado, a RT apresentou os menores valores para todos os indicadores avaliados, evidenciando impactos negativos da conversão da floresta nesse sistema. A análise concluiu que o SAF se mostra como uma alternativa promissora para a agricultura familiar, conciliando produção agrícola e conservação ambiental (FREITAS, 2016).

Outra pesquisa realizada durante o outono e inverno de 2019, buscou analisar a quantidade e o teor de carbono presente na serapilheira coletada em 30 parcelas dentro do fragmento florestal urbano em Curitiba, Paraná, o Capão do Tigre. Os resultados indicaram um aporte total de serapilheira de 11,61 Mg/ha – valor comparável ao encontrado em florestas menos impactadas pela urbanização. A quantidade total de carbono na serapilheira foi de 5,08 t/ha, com o maior teor encontrado na classe miscelânea (44,46%). Apesar da influência da urbanização, o Capão do Tigre demonstrou capacidade de acumular serapilheira e estocar carbono (BATISTA et al., 2020).

Silva et al. (2012) avaliaram o impacto de dois sistemas agroflorestais (SAFs) na qualidade do solo em comparação com agricultura anual e mata secundária em Paraty, no Rio de Janeiro. Os pesquisadores analisaram a deposição de serapilheira, as características químicas do solo e a atividade microbiana, constatando que a poda nos SAFs aumentou de forma exponencial a quantidade de serapilheira e os teores de nutrientes (N, P, K e Mg), equiparando-se aos níveis da mata secundária e superando a agricultura anual. A mata secundária apresentou os maiores valores de carbono orgânico total, nitrogênio total, carbono da biomassa microbiana e respiração basal do solo, indicando um ecossistema mais equilibrado. Os SAFs mostraram valores intermediários para essas variáveis, evidenciando seu papel na melhoria da qualidade do solo. O estudo concluiu que o manejo de poda em SAFs é uma prática eficaz para aumentar os nutrientes na serapilheira e melhorar a qualidade do solo, contribuindo para a sustentabilidade do sistema.

A substituição de ecossistemas e a alteração do uso do solo afetam sobremaneira os estoques de carbono, destacando a importância de práticas sustentáveis, como a restauração de áreas desmatadas e o uso de SAF. Estudos demonstram que o SAF, ao ser comparado com pastagem cultivada e roça de toco, se destaca no armazenamento de carbono no solo e na serapilheira, ajudando na redução das mudanças climáticas e na conservação da biodiversidade. A produção de serapilheira é um indicador importante da saúde dos ecossistemas, e práticas

adequadas de manejo são essenciais para equilibrar a agricultura e a conservação ambiental.

2.8 SISTEMAS AGROFLORESTAIS: UMA ESTRATÉGIA DE MITIGAÇÃO PARA AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As transformações climáticas têm se tornado cada vez mais evidentes na sociedade, acarretando implicações significativas para o processo de desenvolvimento. Entre as atividades mais suscetíveis a essas mudanças, encontram-se aquelas que dependem intensamente de recursos naturais, com destaque notório para a produção agropecuária. Embora seja reconhecida como uma das principais fontes de emissões de GEE, desempenhando um papel essencial no aquecimento global e nas transformações climáticas, a agricultura realiza funções fundamentais na segurança alimentar, no fornecimento de matérias-primas, na produção de bioenergia, na ocupação de uma parcela expressiva da população, no sequestro de carbono e no equilíbrio da balança comercial, tanto do Brasil quanto de outros países (GARCIA et al., 2022), quando manejada de forma sustentável.

A exploração dos recursos naturais ao longo da história da humanidade deixou uma pegada ecológica humana, levando a uma perda da biodiversidade e da qualidade do nosso habitat (SANDERSON et al., 2002). Ademais, as mudanças climáticas iniciadas pela atividade humana apresentam desafios imprevisíveis na atualidade (HERMAN et al., 2020).

Como mencionado em tópicos anteriores, a agropecuária, baseada no monocultivo em larga escala e no uso intensivo de produtos químicos, vem ocasionando o aumento de CO₂ na atmosfera, agravando o aquecimento global. As principais estratégias para reduzir a emissão de GEE provenientes de atividades humanas incluem a minimização do consumo de combustíveis fósseis, a diminuição das taxas de desmatamento e queima de material vegetal, o manejo apropriado do solo, e, por fim, iniciativas para maximizar o sequestro de C no solo e na vegetação (CARVALHO et al., 2010).

Com relação ao processo de sequestro de carbono no solo, este está sujeito a diversos fatores, tais como a cobertura vegetal, práticas de manejo e características específicas do solo. No Brasil, a modificação no uso da terra tem proporcionado alterações nas estruturas e no funcionamento dos ecossistemas naturais, tornando-

se a principal fonte de emissões de GEE. Segundo Seeg (2018), entre os anos de 1990 e 2016, o setor agropecuário emitiu aproximadamente 39 bilhões de toneladas brutas de CO₂, representando 62% do total das emissões antropogênicas de CO₂ no país. Grande parte dessas emissões resultaram do desmatamento, queimadas, degradação ou conversão do solo para atividades agrícolas. A mudança do uso do solo ocorre mediante a remoção de áreas de vegetação nativa para a introdução de sistemas agropecuários, firmando-se enquanto uma prática comum no setor agrícola do Brasil que ocupava cerca de 28,6% do território nacional até 2017 (MAPBIOMAS, 2023). A alteração no uso da terra, originada pela conversão de florestas em áreas agrícolas ou de pecuária, impacta as propriedades físicas e biológicas da superfície terrestre, com potenciais repercussões no clima que afetam tanto o âmbito regional quanto global (BAEDE et al., 2001).

Segundo Lal (2008), o tipo de manejo utilizado na agricultura exerce uma influência direta na dinâmica do carbono no solo, podendo ter impactos positivos na retenção do carbono atmosférico (CO₂), ou, inversamente, emitir CO₂ ou CH₄, uma vez que, se o manejo adotado envolver a conservação do solo com o mínimo de revolvimento, aliado a uma cobertura contínua do solo, proporcionará uma proteção eficaz ao solo, combinando fatores como temperatura, aeração e adição de resíduos vegetais, levando ao aumento da MOS e no acúmulo de carbono no solo.

Da crescente preocupação com o ambiente e da necessidade de resolver paradigmas do desenvolvimento sustentável, a agroecologia busca um modelo alternativo à agricultura industrial. Nesse sentido, a agroecologia revela-se na sociedade assumindo três aspectos:

(...) 1) Como teoria crítica que elabora um questionamento radical a agricultura industrial, fornecendo simultaneamente as bases conceituais e metodológicas para o desenvolvimento de agroecossistemas sustentáveis; 2) Como uma prática social adotada explícita ou implicitamente em coerência com a teoria agroecológica; 3) Como movimento social que mobiliza atores envolvidos prática e teoricamente da Agroecologia (ALTIERI, 2002, p. 23).

Sobre isso, é importante destacar os aspectos ambientais. Altieri (2002) afirma que a sustentabilidade e resiliência dos sistemas agroecológicos são atingidos. Isso ocorre porque verifica-se o aumento da biodiversidade e, com isso, da complexidade dos sistemas agrícolas. Essas melhorias são alcançadas a partir de consórcios entre

espécies, rotações, sistemas agroflorestais, controle natural de pragas, uso de compostagem e adubação verde e aumento da matéria orgânica do solo, contribuindo para a atividade biológica e capacidade de retenção de água (ALTIERI, 2002).

Como demonstrado, os SAFs representam uma opção para mitigar o efeito da intervenção humana no meio ambiente, reproduzindo o ambiente natural através da associação de várias espécies em uma área, o que aumenta a diversidade do Agroecossistema (AE). Nesses sistemas, são aproveitadas as interações benéficas entre plantas de diferentes ciclos, portes e funções, cujo resultado concilia a produção de alimentos com a conservação do meio ambiente.

Os SAFs são apontados como uma estratégia promissora para mitigar as mudanças climáticas devido à sua capacidade de sequestrar carbono. O estudo de Feistauer et al. (2004) demonstra esse potencial ao analisar um SAF com bracatinga (*Mimosa scrubella Benth*) na região de Curitiba. Os pesquisadores quantificaram o carbono total no sistema ao longo de diferentes idades, revelando um aumento progressivo no estoque de carbono de 182,25 t/ha no primeiro ano, para 231,64 t/ha no oitavo ano. Esse acúmulo de carbono ocorre tanto na biomassa vegetal, que cresce continuamente ao longo dos anos, quanto no solo, especialmente na camada superficial (0-10 cm), que se destaca como o principal reservatório. Além disso, esses dados indicam que, mesmo em seu primeiro ano, o SAF conseguiu acumular grande quantidade de carbono dentro do sistema – diferente dos sistemas convencionais, que acabam facilitando a perda do CO₂ para a atmosfera.

Sistemas com a presença de espécies arbóreas atuam como sumidouros de carbono. O estudo de Radomski e Ribaski (2012) demonstrou esse potencial em um sistema silvipastoril com eucalipto (*Corymbia citriodora*) integrado à pastagem de braquiária (*Brachiaria brizantha*). A pesquisa apontou que a presença do eucalipto aumenta significativamente a produção de serapilheira, que acumula cerca de 2 toneladas de carbono por hectare. Esse carbono, proveniente da decomposição da serapilheira, é incorporado ao solo, contribuindo para o sequestro de carbono atmosférico. Além de que, a serapilheira também é fundamental na ciclagem de nutrientes, especialmente em solos suscetíveis à degradação, o que evidencia o papel dos sistemas integrados como uma estratégia para aumentar o estoque de carbono no solo.

Torres et al. (2014) corroboram essa afirmação ao analisarem o potencial de estocagem de carbono em diferentes modelos de SAFs no Brasil. Os pesquisadores

concluíram que a quantidade de carbono sequestrada varia entre 1,26 t C ha⁻¹ ano⁻¹ a 11,19 t C ha⁻¹ ano⁻¹, dependendo da estrutura e idade do sistema. O SAFRA (Sistema Agroflorestal Regenerativo Análogo) se destaca por sua alta capacidade de estocagem, alcançando um incremento médio de carbono acima do solo de 5,06 t C ha⁻¹ ano⁻¹, devido a sua estrutura diversificada, que se assemelha à floresta nativa. O estudo evidencia o papel crucial dos SAFs na mitigação das mudanças climáticas, incentivando sua implementação como alternativa sustentável para o setor agropecuário.

Em adição ao que foi exposto até o presente momento, por imitarem a estrutura de uma floresta natural com diferentes estratos de vegetação, os SAFs promovem uma série de vantagens, entre elas: aumento da biodiversidade, criando um ambiente mais resiliente a pragas e doenças; melhoria da fertilidade do solo, através da ciclagem de nutrientes, fixação de nitrogênio e proteção contra erosão; conservação dos recursos hídricos, regulando o ciclo da água, protegendo o solo e promovendo diversificação da produção, o que proporciona maior segurança alimentar e renda aos agricultores (SILVA, 2001).

Outro ponto a se considerar é que os SAFs demonstram grande potencial para a conservação da biodiversidade em paisagens fragmentadas, atuando como importantes ferramentas na mitigação dos impactos do desmatamento e na promoção da conectividade entre áreas florestais remanescentes. A diversificação de espécies presente nos SAFs, especialmente quando compostos por espécies nativas, contribui para o aumento da riqueza de espécies na paisagem, criando um ambiente mais heterogêneo e propício à sobrevivência de diversas espécies de fauna e flora (MELO et al., 2013).

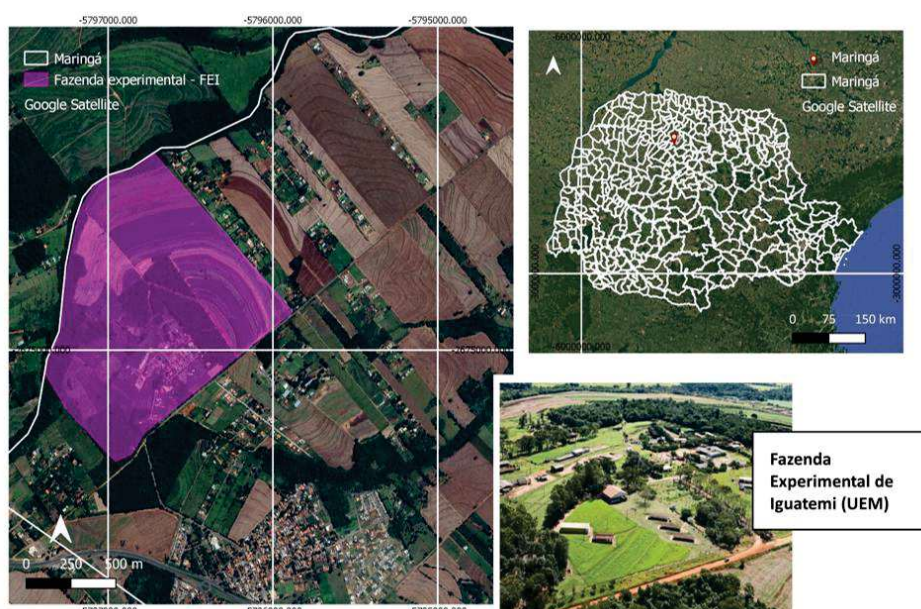
A presença de árvores em diferentes estratos nos SAFs funciona como corredores biológicos, conectando fragmentos florestais isolados e facilitando o deslocamento de animais, o fluxo gênico e a dispersão de sementes (HAGGAR et al., 2019). Somado a isso, a estrutura complexa dos SAFs, ao simular a de florestas naturais, oferece abrigo, alimento e recursos para uma variedade de animais, atuando como habitat para a fauna e auxiliando na manutenção de populações viáveis em paisagens fragmentadas. Portanto, os SAFs, quando bem manejados, atuam de forma decisiva na conservação da biodiversidade, complementando os esforços de proteção em áreas protegidas e contribuindo para a criação de paisagens mais resilientes e sustentáveis.

Em face do cenário atual, a transição para a agricultura regenerativa emerge como uma estratégia altamente promissora na adaptação às mudanças climáticas. A adoção de práticas e manejo agroecológicos, como rotação e consórcios de culturas, implementação de cobertura do solo, redução de insumos químicos, sistemas agroflorestais e utilização de bioinsumos, não apenas favorece a restauração dos ecossistemas, sequestro de carbono, mas também aprimora a segurança alimentar.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está localizada na Fazenda Experimental de Iguatemi (FEI), situada em Iguatemi, Distrito do município de Maringá, no estado do Paraná. A FEI está localizada numa latitude de 23° 25' S; 51° 57' O e 550 metros de altitude (Figura 1). Foi adquirida no final da década de 70, com o objetivo de fornecer um local de suporte para aulas práticas, estágios, desenvolvimento de pesquisas e extensão dos cursos de graduação e pós-graduação em Agronomia e Zootecnia (Figura 2).

Figura 1- Mapa de localização da FEI



Fonte: Elaboração própria, 2025.

De acordo com Spirlandelli et al. (2017), o relevo da região varia de Ondulado a Montanhoso. Os solos são classificados como Latossolos de textura argilosa, Neossolos e Nitossolos (NÚCLEO ESTADUAL DO PARANÁ – SBCS, 2024). A área de coleta na FEI/UEM apresenta solos classificados como Latossolo Vermelho distrófico, com textura franco arenosa nas camadas superficiais (0–20 cm), resultado da origem em arenitos da Formação Caiuá com composição média de 85% de areia, 13% de argila e 2% de silte, confirmando a predominância da fração arenosa e caracterizando o solo como franco arenoso (CEZAR et al., 2012).

No que diz respeito ao clima, segundo o sistema de Köppen, este é caracterizado como Cfa, clima subtropical temperado úmido com verão quente,

apresentando durante o mês mais frio temperaturas abaixo de 18 °C e verões com temperaturas superiores a 22 °C, com geadas pouco frequentes. A vegetação da região está localizada dentro do Bioma Mata Atlântica, onde a fitofisionomia que prevalece é a Floresta Estacional Semidecidual Submontana, de acordo com o Instituto de Terras, Cartografias e Geociência (ITCG).

Figura 2- Imagem panorâmica da FEI



Fonte: Amaral, 2020.

O estudo foi realizado na FEI, em um SAF multiestratificado, composto por espécies de interesse agrícola, principalmente café, cultivadas junto a espécies florestais de uso múltiplo, tanto nativas quanto exóticas, manejadas de forma agroecológica. Além do SAF, o trabalho também abrangeu áreas com monocultura de soja convencional (MS), pastagem convencional (PT) e fragmento de florestal secundário (FFS).

A área que compreende o SAF (Figura 3) presente na FEI, foi implantada em conjunto pelo setor de produção orgânica da Universidade Estadual de Maringá, pelo Mestrado Profissional em Agroecologia (PROFAGROEC), no ano de 2020, tendo em torno de 5 anos.

Figura 3- SAF intensivo em 2024.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Figura 4- Área de pastagem.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Figura 5- Área de Mata nativa.



Fonte: Elaboração própria, 2024

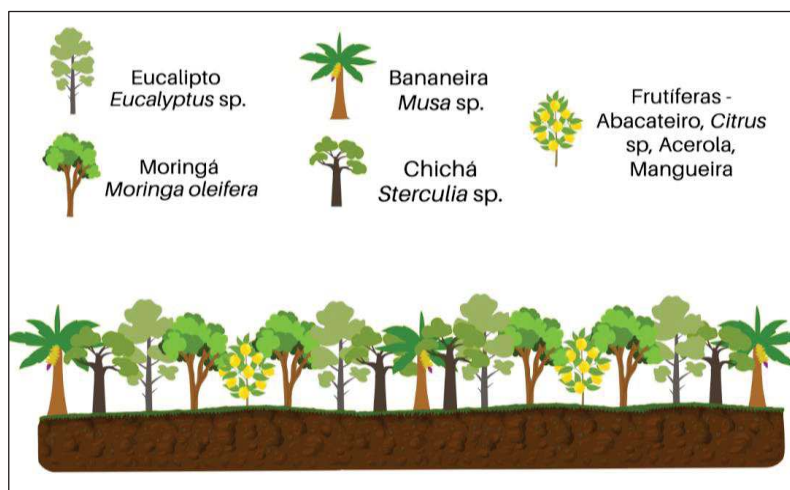
Figura 6- Área de monocultura.



Fonte: Elaboração própria, 2024

O SAF compreende uma área de 0,2 ha, com grande riqueza e abundância de espécies. O sistema é composto por espécies arbóreas nativas e exóticas, frutíferas diversas e a cultura do café. Possui também componente de produção animal, representado pela avicultura colonial para a produção de ovos. As aves completam o seu ciclo de produção (dois anos e meio) e são comercializadas. Um novo plantel será introduzido na área (Figura 7), além de linhas com plantas de café e moringa (Figura 8).

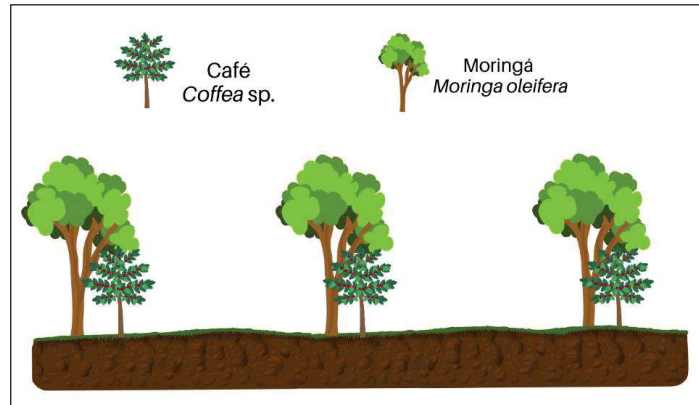
Figura 7- Dimensionamento das linhas do SAF contendo chichá, eucalipto, moringa, bananeira e frutíferas (acerola/manga/citros/abacate).



Fonte: Elaboração própria, 2024.

As linhas estão espaçadas em 1,5 m, sendo que entre duas linhas de arbóreas, arbustivas e bananeiras há duas linhas de café e moringa.

Figura 8- Dimensionamento das linhas de café e moringa.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

A área florestal em estudo possui aproximadamente 4 hectares, caracterizando-se como uma formação de mata secundária com idade estimada superior a 23 anos. No interior do fragmento, foi possível identificar tanto espécies nativas quanto exóticas, como a uva-japonesa (*Hovenia dulcis*). Dentre as espécies nativas observadas, destacam-se o ipê-felpudo (*Zeyheria tuberculosa*), angico-vermelho (*Parapiptadenia rigida*), catiguá (*Trichilia pallida*), canela-guaicá (*Ocotea puberula*), paineira (*Ceiba speciosa*) e louro-pardo (*Cordia trichotoma*), entre outras. O fragmento apresenta regeneração natural em diferentes estágios de desenvolvimento, bem como uma quantidade expressiva de serapilheira, indicando processos ecológicos ativos de ciclagem de nutrientes e manutenção da cobertura vegetal.

A área de monocultivo possui aproximadamente 5 hectares e tem sido utilizada, nos últimos cinco anos, predominantemente para o cultivo de milho (*Zea mays* L.). No entanto, no ano de 2025, essa área foi destinada ao plantio de soja (*Glycine max* (L.) Merr.). Foram realizadas duas coletas de dados na área: a primeira no início do ciclo de cultivo da soja e a segunda aproximadamente uma semana antes da colheita. Essas coletas visaram acompanhar as dinâmicas do solo e da vegetação ao longo do desenvolvimento da cultura.

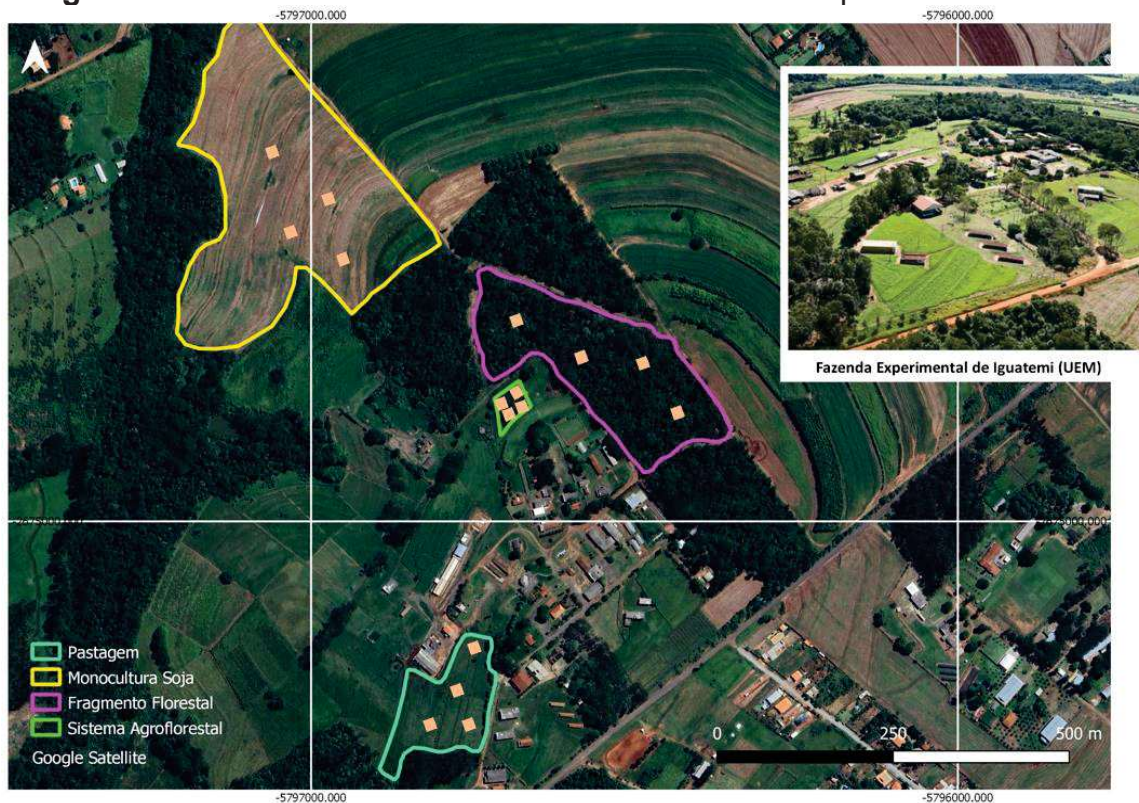
Cabe mencionar que a área destinada à pastagem possui aproximadamente 2,3 hectares, e tem sido utilizada com essa finalidade há pelo menos 10 anos. O local

apresenta indivíduos arbóreos esparsos, distribuídos de forma isolada ao longo da paisagem.

3.1 COLETA DE DADOS

Em cada um dos sistemas de uso da terra (MS, SAF, PT e FFS) foram demarcadas quatro parcelas de 10 m x 10 m para a realização do levantamento fitossociológico. Foram amostrados todos os indivíduos com circunferência à altura do peito (CAP), a 1,30 m do solo, igual ou superior a 15 cm. Para cada indivíduo, foram registrados o valor da CAP (medido com fita métrica), a altura total, o nome comum, o nome científico e a família botânica.

Figura 9- Parcelas de 10x10 demarcadas em cada área para coleta de dados.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

O cálculo dos dados fitossociológicos foi realizado com o auxílio do programa Fitopac (SHEPHERD, 1995), permitindo a determinação dos seguintes parâmetros: número de indivíduos (N), densidades (D), densidades relativas (DR), frequências (F), frequências relativas (FR), dominâncias (Do), dominâncias relativas (DoR) e os

valores de importância organizados em um índice (IVI). Também foi calculado o índice de diversidade de Shannon (H') (SHANNON; WEAVER, 1949).

O cálculo da biomassa de cada indivíduo foi realizado a partir da equação de Brown et al. (1989). As circunferências foram convertidas em diâmetro (DAP) usando a fórmula: **DAP = CAP/π**. Em que: DAP = diâmetro altura do peito (cm); CAP = circunferência altura do peito (cm); π = 3,1416.

O total de biomassa vegetal (Mg ha⁻¹) foi calculado por meio das equações alométricas propostas por Arevalo et al. (2002) para indivíduos vivos, sendo expressa pela fórmula:

$$B_{iv} = 0,1184 \times DAP^{2,53}$$

Onde:

B_{iv} = biomassa de árvores vivas em pé

0,1184 = constante

DAP= diâmetro da altura do peito DAP (cm)

2,53 = constante

Os valores obtidos foram multiplicados por 0,5 para calcular o estoque de carbono na biomassa aérea (HIGUCHI E CARVALHO, 1995 KRAENZEL et al., 2003). Os indivíduos de *Coffea* spp. não foram contemplados na amostragem em razão de suas particularidades estruturais e dificuldades metodológicas associadas à coleta. A biomassa viva foi analisada somente em indivíduos arbóreos com CAP ≥ 15 cm (BROWN, 1997; HIGUCHI et al., 1998) e em estruturas herbáceas incorporadas à serapilheira. Além disso, a coleta e posterior secagem do material de café apresentaram desafios logísticos e metodológicos. Apesar disso, é válido reiterar a importância do café como espécie agrícola de relevância econômica e ecológica, de modo que análises específicas de sua biomassa e contribuição ao estoque de carbono poderão ser realizadas em estudos futuros, com protocolos próprios para coleta e secagem desse material.

Para a coleta das amostras de serapilheira, utilizou-se um gabarito com dimensões de 0,38 m × 0,35 m, aplicado nas mesmas parcelas previamente delimitadas para o levantamento fitossociológico. O gabarito foi lançado aleatoriamente sobre o solo, e foram realizadas três repetições por parcela. As subamostras obtidas em cada parcela foram reunidas para formar uma amostra

composta (FROUFE, 2011). Assim, em cada área, 12 subamostras foram coletadas, resultando em quatro amostras compostas (repetições) por área, totalizando 16 unidades amostrais no experimento. O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, considerando as quatro áreas de uso do solo como tratamentos.

Figura 10- Delimitação de parcelas para amostragem.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Figura 11- Gabarito utilizado para coleta de serapilheira.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Figura 12- Material armazenado em sacola de papel.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Figura 13- Material armazenado e etiquetado.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Após a coleta, os materiais amostrados foram secos em estufa a 60 °C por até sete dias, sendo então separados nas seguintes frações: (1) folhas, (2) material lenhoso (com diâmetro de até 2 cm), (3) estruturas reprodutivas (incluindo flores, sementes e frutos) e demais componentes. Impurezas foram removidas. Posteriormente, cada fração foi pesada em balança de precisão (0,01 g), e os resultados de massa seca (g) foram convertidos para kg·ha⁻¹.

A quantidade de carbono presente na serapilheira foi estimada multiplicando a massa seca pelo fator 0,5, assumindo-se que, em média, 50% da biomassa é composta por C (HIGUCHI; CARVALHO, 1994; KRAENZEL, 2002; SOARES;

OLIVEIRA, 2002). Nas parcelas avaliadas, foram coletadas amostras de solo e serapilheira, além da condução de um inventário fitossociológico para quantificar o estoque de carbono em cada compartimento.

3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do *software* PAST (*Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis*), versão 5.1 (HAMMER et al., 2023). A escolha desse *software* justifica-se em razão de sua ampla aplicação em estudos ecológicos e ambientais, com ferramentas robustas para verificação de pressupostos estatísticos e análise de variância.

A normalidade dos resíduos foi avaliada por meio do teste de Shapiro-Wilk, a fim de verificar a adequação dos dados brutos das variáveis à distribuição normal. Ambos os conjuntos de dados das variáveis: Biomassa Morta e Biomassa viva, não apresentaram distribuição normal, inviabilizando a aplicação direta de testes paramétricos.

Diante da não normalidade dos dados, foi aplicada a transformação de Box-Cox, com o objetivo de atender aos pressupostos da análise de variância. O valor ótimo de lambda (λ) obtido para a Var1 foi de 0,317, com log likelihood de -15,3448. Para a variável Biomassa viva, o valor de λ foi 0,1456, com log likelihood de 11,0473. Essas transformações permitiram a continuidade das análises com base em métodos paramétricos.

Com os dados transformados, procedeu-se à realização da análise de variância (ANOVA), empregada para testar a hipótese nula de que as médias das quatro áreas de cobertura vegetal eram estatisticamente iguais. O teste baseia-se na decomposição da variância total observada em duas componentes: a variância entre os grupos (entre áreas) e a variância dentro dos grupos (entre repetições de uma mesma área). A estatística F foi calculada como a razão entre o quadrado médio entre os grupos e o quadrado médio dentro dos grupos, considerando seus respectivos graus de liberdade.

A homogeneidade das variâncias foi verificada por meio do teste de Levene, aplicado em duas versões: uma baseada nas médias e outra nas medianas. A versão baseada nas médias é mais sensível para distribuições normais ou simétricas, enquanto a versão baseada nas medianas é mais robusta diante de desvios de

normalidade. Nos casos em que o teste de Levene indicou a presença de heterogeneidade de variâncias, procedeu-se à análise de variância utilizando a versão de Welch da ANOVA, ajustada especificamente para lidar com variâncias desiguais entre os grupos.

Além da análise de significância estatística, buscou-se avaliar a magnitude do efeito por meio de três indicadores complementares. Primeiro, o Coeficiente de Correlação Intraclassa (ICC) foi utilizado para estimar a proporção da variância total explicada pelas diferenças entre os grupos. Segundo, o Ômega quadrado (ω^2) permitiu a estimativa do tamanho do efeito com base na variância explicada. Por fim, o terceiro, o Fator de Bayes (Bayes Factor - BF) foi calculado conforme a abordagem Jeffrey-Zellner-Siow (JZS), fornecendo uma medida da força da evidência em favor da hipótese alternativa.

As comparações múltiplas entre médias foram realizadas através do teste de Tukey HSD (*Honest Significant Difference*), apropriado para controlar o erro tipo I no conjunto de comparações. Os resultados foram apresentados por meio dos valores de Q de Tukey (abaixo da diagonal) e dos valores de p (acima da diagonal) para cada par de grupos. Todas as inferências estatísticas consideraram um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). As interpretações dos resultados foram baseadas exclusivamente nos dados transformados, demonstrando conformidade com os pressupostos dos testes estatísticos aplicados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tópico 4.1 e 4.2 apresentam a seguir os resultados da análise estatística aplicada às variáveis Var1 e Biomassa viva, que representam, respectivamente, a biomassa morta e a biomassa viva. Os dados foram obtidos em quatro diferentes sistemas de uso do solo: Floresta, Monocultura, Pastagem e Sistema Agroflorestal (SAF). Foram realizadas análises descritivas, ANOVA e comparações múltiplas (Tukey HSD), adotando-se um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

4.1 ANÁLISE DA BIOMASSA MORTA

4.1.1 Estatísticas Descritivas

A análise descritiva da biomassa morta (BM) ofereceu uma compreensão inicial sobre seu comportamento frente aos diferentes usos do solo, com dados obtidos a partir de quatro repetições em cada uma das áreas experimentais (Tabela 1).

Tabela 1- Estatísticas Descritivas Detalhadas da Biomassa Morta (FF – Fragmento Florestal; MONO – Monocultura; PT – Pastagem; SAF – Sistema Agroflorestal

Área	Nº de rep.	Valor Min.	Valor Max.	Soma	Média	Erro Padrão	Variância	Desvio Padrão	Mediana	Q1	Q3	CV%
FF	4	6,740	3,373	29,860	7,460	0,404	0,655	0,809	7,370	6,760	8,260	10,840
MONO	4	0,384	1,250	2,790	0,690	0,203	0,163	0,404	0,575	0,392	1,120	57,960
PT	4	1,049	2,081	6,440	1,610	0,264	0,280	0,529	1,655	1,103	2,070	32,860
SAF	4	4,869	7,680	22,740	5,680	0,667	1,780	1,334	5,090	4,920	7,034	23,470

Fonte: Elaboração própria, 2024.

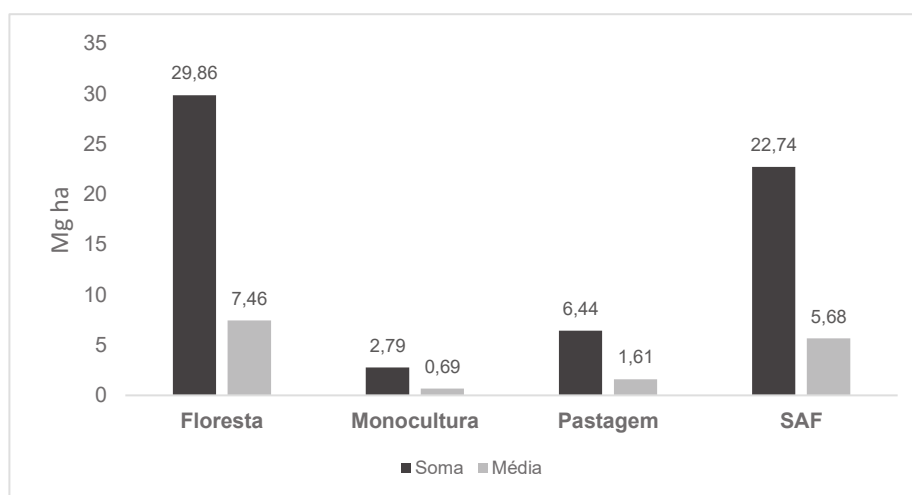
A área de Floresta apresentou o maior valor médio (7,460) e mediana (7,370), além da menor variabilidade entre os ambientes. O desvio padrão foi de 0,809 e o coeficiente de variação (CV) foi de apenas 10,84%, indicando elevada consistência dos dados. A amplitude, variando entre 6,740 e 8,260, também foi relativamente reduzida.

Em contraste, a Monocultura registrou os menores valores de média (0,690) e mediana (0,575), com o CV mais elevado entre todas as áreas (57,96%). Esse resultado reflete uma alta dispersão dos dados, apontando para baixa estabilidade e

possíveis influências de anomalias ou interferências locais. A amplitude e a distância interquartil ($Q1 = 0,384$; $Q3 = 1,120$) reforçam essa instabilidade.

A Pastagem apresentou valores intermediários, com média de 1,610 e mediana de 1,655. O CV foi de 32,86%, revelando uma variabilidade menor que a Monocultura, mas ainda significativa, e consistência inferior à verificada na Floresta. O Sistema Agroflorestal (SAF) mostrou a segunda maior média (5,680) e mediana (5,090), além da maior amplitude total (mínimo de 4,869 e máximo de 7,680). O desvio padrão de 1,334 e o CV de 23,47% indicaram uma dispersão moderada, inferior à observada nas áreas de Monocultura e Pastagem, porém superior à da Floresta.

Figura 14- Somas e Médias de biomassa morta nas áreas de estudo.

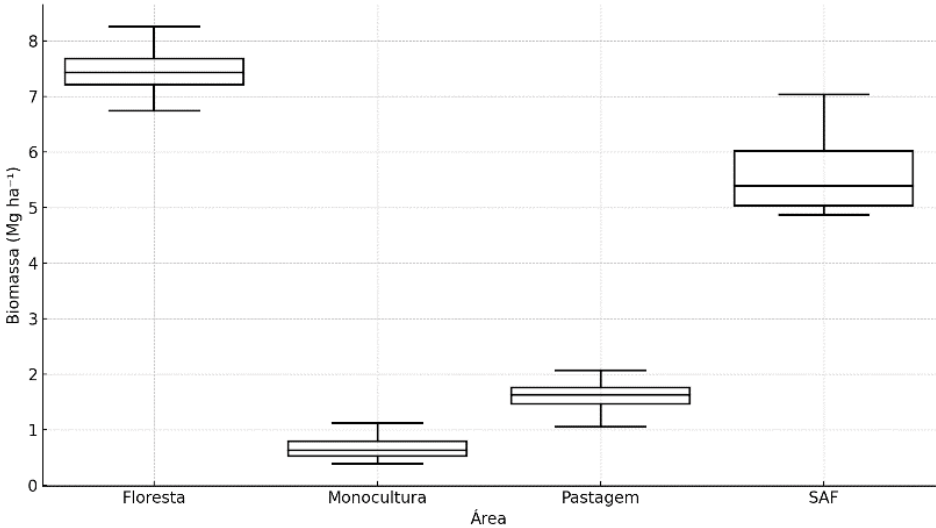


Fonte: Elaboração própria, 2024.

Em síntese, os dados demonstram que os usos do solo mais intensivos, como Monocultura e Pastagem, estão associados a maior variabilidade relativa em Var1. Por outro lado, os sistemas mais complexos e biodiversos, como Floresta e SAF, tendem a apresentar valores consistentes dessa variável, reforçando a influência do tipo de uso do solo sobre sua estabilidade e magnitude.

A Figura 15 reforça visualmente a consistência dos dados em cada grupo experimental. Observa-se baixa variabilidade interna nas áreas de Floresta e SAF, enquanto a Monocultura apresenta maior dispersão e disparidade entre os valores. Esse padrão está em consonância com o elevado coeficiente de correlação intraclasses ($ICC = 0,939$), que indica que aproximadamente 94% da variação total da biomassa morta é atribuída às diferenças entre os tipos de uso do solo, confirmando a robustez da separação entre os grupos.

Figura 15- Distribuição da Biomassa por Área (Boxplot)



Fonte: Elaboração própria, 2024.

4.1.2 Análise do Teste ANOVA e Interpretação Estatística da Biomassa morta

A presente análise estatística teve como objetivo avaliar a variável Var1 em quatro áreas experimentais distintas: Floresta, Monocultura, Pastagem e SAF (Sistema Agroflorestal). Por meio da aplicação do teste ANOVA, complementado pelo teste de comparações múltiplas de Tukey, foram identificadas diferenças estatisticamente significativas nas médias dessa variável entre os ambientes avaliados.

4.1.3 Resultados do Teste ANOVA

A análise de variância (ANOVA) revelou um valor de $F = 62,64$, que supera de forma expressiva o valor crítico de $F (3,49)$, considerando um nível de significância de 5%. O p-valor associado ($1,34 \times 10^{-4}$) indica uma probabilidade extremamente baixa de que as médias entre os grupos sejam iguais por acaso. Portanto, rejeita-se a hipótese nula (H_0) de igualdade entre as médias das áreas, concluindo-se que há diferenças estatisticamente significativas entre os grupos.

A soma dos quadrados entre os grupos (274,462) indica que grande parte da variabilidade em Var1 é explicada pelas diferenças entre os ambientes, enquanto a

soma dos quadrados dentro dos grupos (175,268) representa a variação residual. Desse modo, rejeita-se a hipótese nula (H_0) de que as médias das 4 áreas são iguais. A conclusão é a de que Var1 apresenta diferenças significativas entre as áreas.

4.1.4 Componentes da Variância e Consistência

A decomposição da variância reforça a robustez dos resultados. A variância entre grupos (225,067) supera amplamente a variância residual (0,146), o que indica baixa interferência de variabilidade aleatória nos dados. Este cenário é corroborado pelo Coeficiente de Correlação Intraclassa (ICC = 0,93906), que aponta que aproximadamente 94% da variabilidade total de Var1 se deve às diferenças entre as áreas, evidenciando alta consistência intragrupo.

4.1.5 Magnitude do Efeito

O cálculo do ω^2 (0,9204) reforça a relevância prática dos resultados, indicando que mais de 92% da variabilidade total em Var1 é explicada pelo fator grupo (área experimental). Esse valor é considerado um efeito de magnitude extremamente alta, demonstrando que a área onde a variável foi medida tem papel determinante sobre os valores observados.

4.1.6 Homogeneidade de Variância – Teste de Levene

Para validar os pressupostos do teste ANOVA, o teste de Levene foi aplicado, tanto com base nas médias ($p = 0,3054$) quanto nas medianas ($p = 0,5246$). Em ambos os casos, os valores de p foram superiores ao nível de significância de 0,05, indicando que as variâncias entre os grupos podem ser consideradas homogêneas. Isso confirma a adequação do modelo ANOVA, garantindo que as inferências estatísticas feitas são válidas.

4.1.7 Teste de Tukey – Comparações Múltiplas

Após a rejeição da hipótese nula na ANOVA, foi aplicado o teste de comparações múltiplas de Tukey (HSD), com nível de significância de 5%, para

identificar quais pares de áreas apresentaram diferenças estatisticamente significativas na biomassa. A matriz a seguir demonstra os valores de p (probabilidade de igualdade entre médias) e os valores de Q-Tukey (magnitude da diferença padronizada) para cada par de comparação:

Tabela 2- Matriz de Comparações de Tukey (Teste HSD)

	Floresta	Monocultura	Pastagem	SAF
Floresta	***	2,78E-04	9,19E-03	0,2832
Monocultura	16,84	***	0,02811	1,84E-03
Pastagem	12,17	5	***	0,0001091
SAF	2,67	14,17	10	****

Fonte: Elaboração própria, 2024.

Nota: A matriz exibe os resultados do teste de Tukey (HSD) entre as médias de biomassa (Mg ha^{-1}) nas quatro áreas. Acima da diagonal: p-valores (vermelho = $p < 0,05$, diferença significativa). Abaixo da diagonal: Q-Tukey (azul = $Q > 10$, diferença com grande magnitude). Células diagonais indicam comparações do grupo consigo mesmo

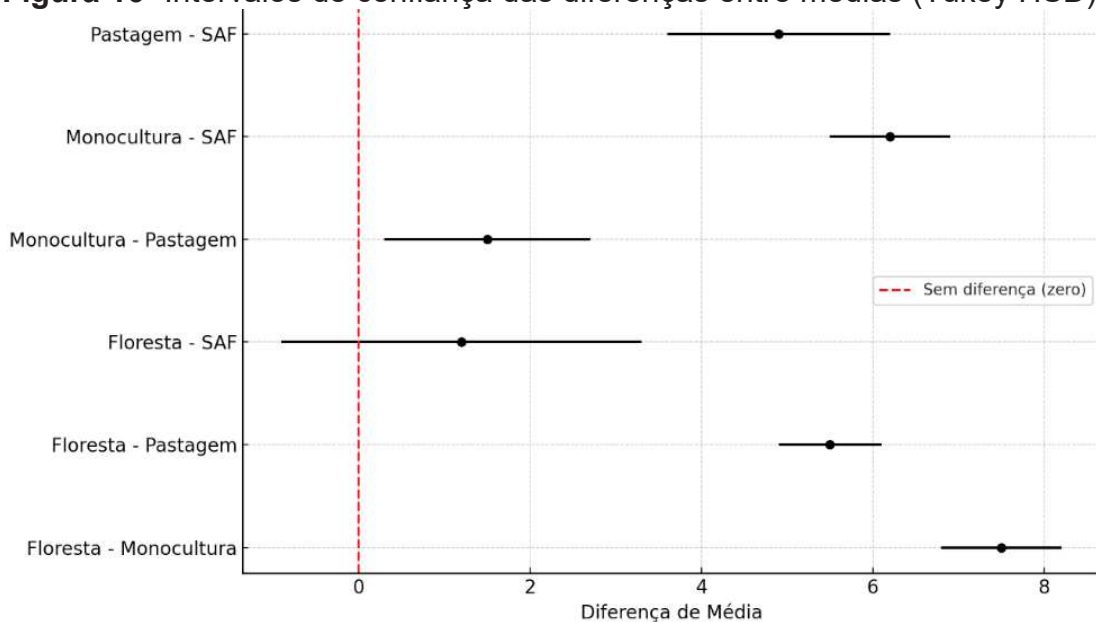
A análise detalhada das comparações expôs que o par Floresta vs. Monocultura apresentou um valor de Q igual a 16,84 e $p = 2,784\text{E-}04$, indicando uma diferença altamente significativa entre as médias, com probabilidade praticamente nula de igualdade. Resultado semelhante foi observado entre Floresta e Pastagem ($Q = 12,17$; $p = 9,19\text{E-}03$), indicando também uma diferença significativa.

Em contrapartida, a comparação entre Floresta e SAF ($Q = 2,67$; $p = 0,2832$) não apresentou diferença estatisticamente significativa, sendo este o único par com p-valor acima do nível de significância adotado. A comparação entre Monocultura e Pastagem ($Q = 4,667$; $p = 0,02811$) indicou uma diferença expressiva, embora de menor magnitude em relação às demais. Já os pares Monocultura vs. SAF ($Q = 14,17$; $p = 1,84\text{E-}03$) e Pastagem vs. SAF ($Q = 9,502$; $p = 0,0001091$) revelaram diferenças substanciais.

Esses resultados reforçam que, com exceção do par Floresta e SAF, todos os demais grupos diferem significativamente entre si quanto aos valores médios de Var1, evidenciando o impacto do uso do solo na variável analisada, reforçando a hipótese de que sistemas mais complexos e biodiversos, como Floresta e SAF, compartilham características semelhantes quanto à variável analisada, enquanto sistemas mais simplificados, como Monocultura e Pastagem, apresentam comportamentos distintos e significativamente inferiores.

Para complementar a análise das comparações múltiplas, foi construído um gráfico com os intervalos de confiança obtidos no teste de Tukey HSD (Figura 16). O gráfico ilustra os intervalos de confiança das diferenças entre médias de var1 obtidos pelo teste de Tukey HSD. As comparações entre Floresta vs. Monocultura, Floresta vs. Pastagem, Monocultura vs. SAF e Pastagem vs. SAF apresentaram intervalos que não cruzam o zero, indicando diferenças estatisticamente significativas. Por outro lado, o intervalo de Floresta vs. SAF inclui o zero, sugerindo ausência de diferença significativa entre esses dois sistemas. Esses resultados reforçam que sistemas mais complexos, como Floresta e SAF, compartilham padrões semelhantes de biomassa, enquanto áreas simplificadas apresentam desempenho inferior e estatisticamente distinto.

Figura 16- Intervalos de confiança das diferenças entre médias (Tukey HSD).



Fonte: Elaboração própria, 2024.

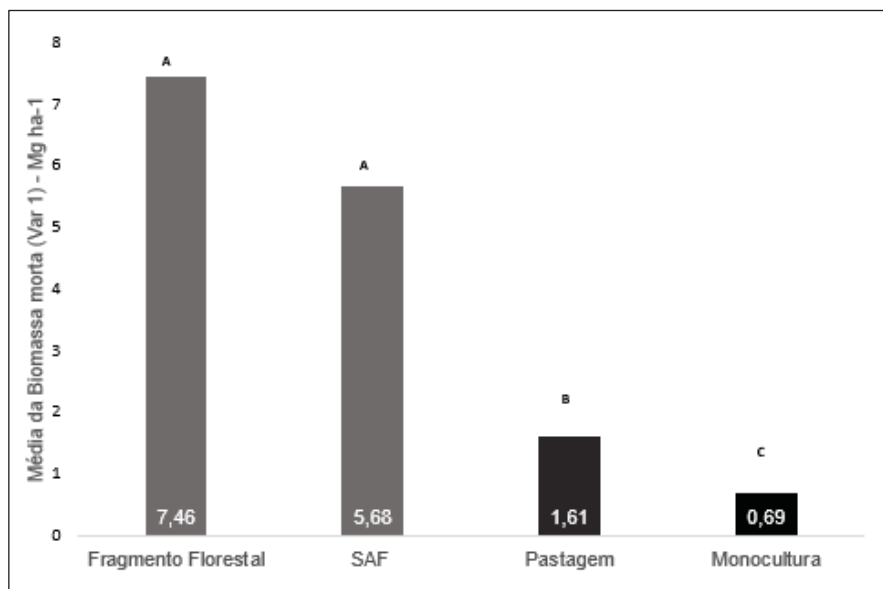
Nota: Comparações cujos intervalos não cruzam o zero indicam diferença estatisticamente significativa entre os grupos ($\alpha = 0,05$).

4.1.8 Agrupamentos e Gradiente de Complexidade

Com base nas comparações múltiplas realizadas, foi possível agrupar as áreas estudadas conforme a similaridade de seus efeitos sobre a biomassa morta. A Floresta e o SAF formam o primeiro grupo, caracterizado por não apresentarem diferença estatística significativa entre si. A Pastagem constitui um segundo grupo, com valores expressivos distintos dos demais, enquanto a Monocultura compõe um

terceiro grupo, também isolado em função de suas diferenças estatísticas em relação às outras áreas. A análise das médias reforça esse padrão de agrupamento: a Floresta apresentou o maior valor médio (7,460), seguida pelo SAF (5,680), ambos com médias elevadas. A Pastagem, com média de 1,610, ocupou uma posição intermediária inferior, enquanto a Monocultura registrou a menor média (0,690). Esse gradiente de valores sugere uma relação direta entre a complexidade ecológica dos sistemas e os valores de biomassa morta. Sistemas mais biodiversos ou naturais, como a Floresta e o SAF, tendem a apresentar valores mais altos, enquanto áreas mais simplificadas e antropizadas, como a Monocultura e a Pastagem, resultam em valores substancialmente reduzidos.

Figura 17- Agrupamentos e Gradiente de Complexidade.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Nota: O gráfico exibe as médias de biomassa por área e os agrupamentos estatísticos do teste de Tukey. Letras iguais indicam ausência de diferença significativa. A ordenação das médias revela um gradiente de complexidade ecológica, com maior biomassa em sistemas mais biodiversos (Floresta e SAF) e menores valores em ambientes antropizados (Pastagem e Monocultura).

A análise estatística conduzida – integrando ANOVA, teste de Tukey, medidas de variabilidade e magnitude de efeito – demonstrou de forma robusta que a variável Var1 é altamente influenciada pelo uso do solo. Os resultados revelaram um padrão claro: áreas com maior complexidade ecológica, como a Floresta e o Sistema Agroflorestal (SAF), apresentaram os maiores valores médios de Var1, com diferença significativa em relação aos sistemas mais simplificados, como a Monocultura e a Pastagem.

A ausência de diferença significativa entre Floresta e SAF destaca o potencial dos sistemas agroflorestais em manter condições funcionais próximas às de ecossistemas naturais. Essa similaridade reforça a viabilidade desses sistemas como alternativas sustentáveis que conciliam produtividade com conservação ambiental. Já os baixos valores de Var1 encontrados em áreas de Monocultura e Pastagem sugerem perda de atributos ecológicos relevantes, o que indica a necessidade de revisar estratégias de manejo nesses sistemas, especialmente quando se busca maior funcionalidade ambiental.

A elevada magnitude do efeito ($\omega^2 > 0,9$) e o alto coeficiente de correlação intraclasse ($ICC > 0,93$) conferem alta confiabilidade às inferências realizadas, fortalecendo a validade estatística dos achados e fornecendo respaldo técnico para decisões voltadas ao planejamento do uso do solo.

4.2 ANÁLISE DA BIOMASSA VIVA

4.2.1 Estatísticas Descritivas

A biomassa viva é definida tal qual os indivíduos regenerantes, com CAP inferior que 5 cm. As áreas de Floresta e SAF apresentaram os menores valores médios de biomassa viva, além dos maiores coeficientes de variação, indicando elevada variabilidade relativa. Enquanto a Monocultura e Pastagem apresentaram maiores médias com menor variabilidade relativa.

Tabela 3- Estatísticas Descritivas Detalhadas da Biomassa VivaMorta (FF – Fragmento Florestal; MONO – Monocultura; PT – Pastagem; SAF – Sistema Agroflorestal)

Área	Nº de rep.	Valor Min.	Valor Max.	Soma	Média	Erro Padrão	Variância	Desvio Padrão	Mediana	Q1	Q3	CV%
FF	4	0,003	0,070	0,130	0,033	0,015	0,001	0,030	0,029	0,006	0,063	90,94
MONO	4	1,201	3,290	8,000	2,000	0,453	0,821	0,906	1,750	1,303	2,942	45,31
PT	4	1,200	3,500	8,083	2,020	0,535	0,573	1,070	1,880	1,066	3,108	52,95
SAF	4	0,003	0,168	0,283	0,071	0,038	0,006	0,077	0,056	0,006	0,150	108,51

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Na área de Floresta, observou-se uma das menores médias (0,033) – valor próximo ao registrado na área de SAF. Essa baixa média indica desempenho reduzido da variável biomassa viva nesse ambiente. Apesar disso, a variabilidade foi proporcionalmente elevada, com desvio padrão de 0,030 e coeficiente de variação (CV%) de 90,94%, refletindo alta dispersão relativa. No entanto, a variância foi a menor entre todos os sistemas (0,001), e o intervalo de valores foi bastante estreito (mínimo de 0,003 e máximo de 0,070); o que sugere uma distribuição relativamente estável. Os percentis ($Q1 = 0,006$ e $Q3 = 0,063$) apontam para uma menor amplitude de dispersão interna.

Na Monocultura, a média foi de 2,000, a segunda maior entre os grupos. A variabilidade relativa à média foi baixa, com CV% de 45,31%. O desvio padrão (0,906) e a variância (0,821) indicam dispersão moderada. A amplitude entre valores extremos variou de 1,201 a 3,290, enquanto os percentis ($Q1 = 1,303$ e $Q3 = 2,942$) revelaram uma distribuição mais concentrada em torno da média.

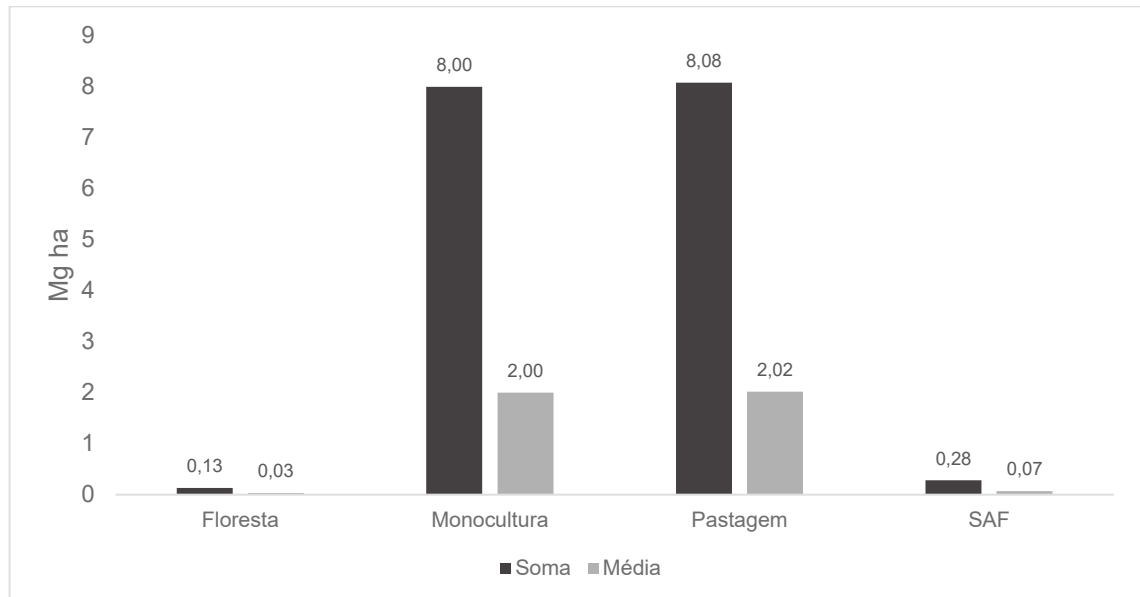
A Pastagem apresentou a maior média (2,020), muito próxima à da Monocultura. Contudo, destacou-se por maior variabilidade, evidenciada por um desvio padrão de 1,070 e CV% de 52,95%. Essa área apresentou também a maior amplitude entre os valores extremos (de 1,200 a 3,500), refletindo maior heterogeneidade nos dados. Os quartis ($Q1 = 1,304$ e $Q3 = 3,108$) também confirmam ampla dispersão.

O Sistema Agroflorestal (SAF) apresentou média baixa (0,071), também próxima à da Floresta. Apesar de apresentar variância (0,006) e desvio padrão (0,077) relativamente baixos, o valor médio reduzido resultou em um CV% extremamente elevado (108,51%). A amplitude foi estreita (mínimo = 0,003; máximo = 0,168), e os percentis ($Q1 = 0,006$; $Q3 = 0,150$) indicaram menor dispersão relativa quando comparados aos sistemas mais antropizados.

Em linhas gerais, Floresta e SAF apresentaram os menores valores médios da variável biomassa viva e maior regularidade nos dados, com distribuição relativamente estável. O alto CV% no SAF, no entanto, é decorrente da baixa magnitude da média, o que inflaciona o valor relativo da variabilidade. Monocultura e Pastagem, por outro lado, revelaram médias mais elevadas, com dispersão mais controlada na Monocultura e mais acentuada na Pastagem. O coeficiente de variação destacou o SAF como o ambiente mais variável em termos relativos e a Monocultura como o mais

estável, reforçando a influência do tipo de uso do solo sobre o comportamento da variável em estudo.

Figura 18- Somas e médias de Biomassa Viva (Mg Ha)



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Os resultados obtidos para a biomassa viva evidenciam a influência direta do uso do solo sobre a estrutura da vegetação regenerante. Os sistemas mais antropizados, como a Monocultura e a Pastagem, apresentaram as maiores médias de biomassa viva para indivíduos com CAP inferior a 15 cm, refletindo maior presença de vegetação em estágios iniciais de desenvolvimento. Essa predominância de indivíduos jovens pode ser explicada pelo caráter aberto e frequentemente perturbado desses ambientes, favorecendo o estabelecimento de espécies pioneiras com rápido crescimento.

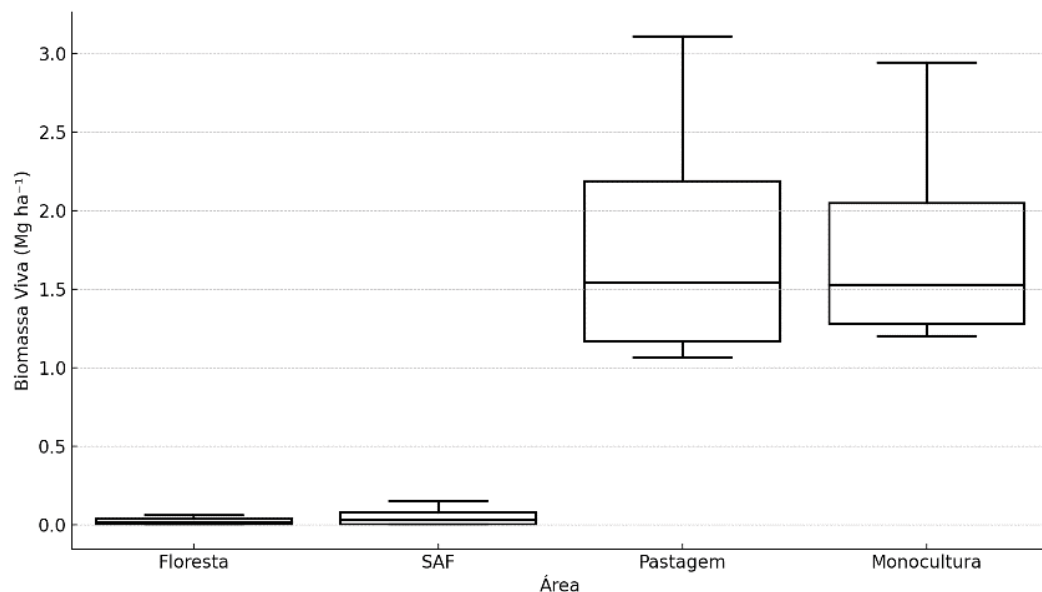
Por sua vez, as áreas de Floresta e de SAF apresentaram as menores médias de biomassa viva, embora por razões ecológicas distintas. No fragmento florestal, a baixa biomassa de indivíduos com CAP inferior a 15 cm está associada ao estágio mais avançado de sucessão ecológica, caracterizado por um dossel fechado e alta complexidade estrutural. Nesses ambientes, a entrada de luz no sub-bosque é limitada, o que reduz o crescimento e a abundância de indivíduos jovens, refletindo um sistema mais estável e maduro. Já no SAF, a menor média pode estar relacionada ao estágio específico de desenvolvimento do sistema ou ao manejo adotado, que

pode influenciar a densidade e a distribuição dos regenerantes, ainda que esses ambientes apresentem em geral uma diversidade estrutural significativa.

Dessa forma, os diferentes usos do solo influenciam não apenas a quantidade de biomassa viva regenerante, mas também sua distribuição espacial e a variabilidade entre parcelas, revelando os distintos estágios sucessionais e condições ecológicas presentes em cada sistema.

A Figura 19 apresenta a distribuição da biomassa viva por sistema de uso do solo. As áreas de Floresta e SAF concentram-se em valores mais baixos, enquanto Monocultura e Pastagem mostram valores mais elevados e dispersos. A linha central de cada caixa representa a mediana, as extremidades da caixa representam o primeiro e terceiro quartis, e os extremos dos bigodes indicam a dispersão dos dados. O gráfico abaixo permite comparar rapidamente a variação interna e a separação entre os grupos.

Figura 19- Distribuição da Biomassa viva por área (Boxplot).



Fonte: Elaboração própria, 2025.

4.2.2 Análise do Teste ANOVA e Interpretação Estatística da Biomassa Viva

Esta estatística teve como objetivo avaliar a variável biomassa viva em quatro áreas experimentais distintas: Floresta, Monocultura, Pastagem e SAF. Por meio da

aplicação do teste ANOVA – complementado pelo teste de comparações múltiplas de Tukey –, foram identificadas diferenças estatisticamente significativas nas médias dessa variável entre os ambientes avaliados.

A análise de variância (ANOVA) aplicada à variável biomassa viva revelou diferenças significativas entre as áreas avaliadas. O valor de F obtido foi 10,37, superior ao valor crítico F (3,49) para o nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), e o p-valor associado foi 0,001189, indicando forte evidência contra a hipótese nula. A soma dos quadrados entre os grupos (15,3500) indicou que grande parte da variabilidade em Biomassa viva é explicada pelas diferenças entre os ambientes, enquanto a soma dos quadrados dentro dos grupos (5,9100) representa a variação residual. Desse modo, rejeita-se a hipótese nula (H_0) de que as médias das quatro áreas são iguais. Por fim, a conclusão a que se chega é de que a biomassa viva apresenta diferenças estatisticamente significativas entre os grupos.

Adicionalmente, foi aplicado o teste de Welch, utilizado quando há suspeita de heterocedasticidade (variâncias desiguais). O valor de F obtido foi 8,908 com graus de liberdade ajustados ($df = 5,41$) e p-valor de 0,01587, reforçando a existência de diferenças significativas entre as médias das áreas, mesmo sob a suposição de variâncias desiguais.

Além disso, é importante observar que os diferentes valores de F e p-valor apresentados decorrem da aplicação de diferentes testes estatísticos. O teste ANOVA clássico pressupõe homogeneidade de variâncias e se baseia na decomposição da soma dos quadrados entre e dentro dos grupos. Já o teste de Welch funciona enquanto uma alternativa robusta, aplicado quando há suspeita de variâncias desiguais entre os grupos e utilização de graus de liberdade ajustados. Por esse motivo, os valores de F e p-valor resultantes do teste de Welch diferem daqueles obtidos na ANOVA tradicional.

4.2.3 Componentes da Variância e Consistência

A variância entre os grupos ($\text{Var}(\text{grupo}) = 1,1550$) foi superior à variância residual ($\text{Var}(\text{erro}) = 0,4930$), indicando que a maior parte da variabilidade de biomassa viva pode ser atribuída às diferenças entre os ambientes avaliados. O Coeficiente de Correlação Intraclassa (ICC = 0,7008) indica que aproximadamente 70,1% da variação total está relacionada às diferenças entre grupos.

4.2.4 Magnitude do Efeito

O valor de ω^2 ($\omega^2 = 0,6373$) expressa que cerca de 63,7% da variação na biomassa viva pode ser explicada pelo uso do solo, caracterizando um efeito de magnitude elevada. Isso reforça que o tipo de uso da terra exerce influência determinante sobre os estoques de biomassa viva, evidenciando diferenças significativas entre sistemas biodiversos (como floresta e SAF) e sistemas simplificados (como monocultura e pastagem).

4.2.5 Homogeneidade de Variância – Teste de Levene

Os testes de Levene indicaram possível heterogeneidade de variâncias entre os grupos, com $p = 0,0343$ (médias) e $p = 0,0793$ (medianas). Como o valor baseado nas médias é inferior ao nível de significância de 0,05, há evidência estatística de violação da homogeneidade de variâncias, o que justifica a aplicação do teste de Welch como alternativa robusta à ANOVA tradicional.

4.2.6 Teste de Tukey – Comparações Múltiplas

O teste de comparações múltiplas de Tukey foi aplicado com o objetivo de identificar diferenças estatísticas significativas entre as médias da variável biomassa viva entre os diferentes sistemas de uso do solo. O teste utiliza os valores das diferenças padronizadas (Q) e os valores de probabilidade (p), considerando o nível de significância de $\alpha = 0,05$.

Tabela 4- Matriz de Comparações de Tukey (Teste HSD)

	Floresta	Monocultura	Pastagem	SAF
Floresta	***	0,0001	0,0001	0,9410
Monocultura	9,5200	***	0,9990	0,0002
Pastagem	9,4400	0,0741	***	0,0003
SAF	0,7930	8,7300	8,6550	***

Fonte: Elaboração própria, 2024.

Nota: A matriz exibe os resultados do teste de Tukey (HSD) entre as médias de biomassa viva (Mg ha^{-1}) nas quatro áreas. Acima da diagonal: p-valores (vermelho = $p < 0,05$, diferença significativa). Abaixo da diagonal: Q-Tukey (azul = $Q > 10$, diferença com grande magnitude). Células diagonais indicam comparações do grupo consigo mesmo.

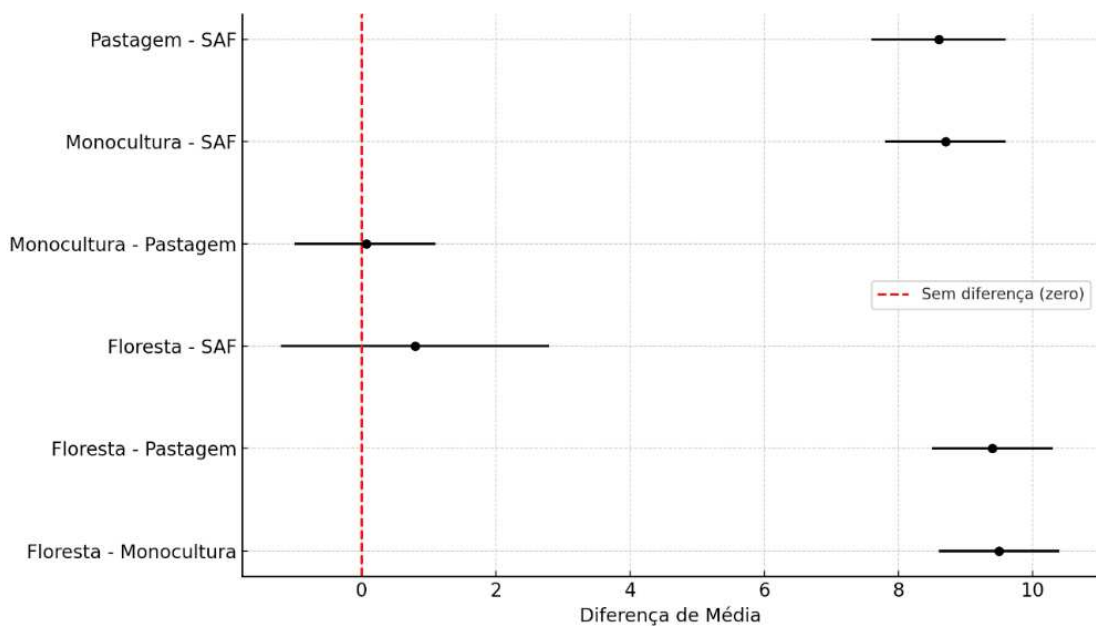
As comparações revelaram que Floresta difere significativamente tanto de Monocultura ($Q = 9,520$; $p = 0,0001$) quanto de Pastagem ($Q = 9,440$; $p = 0,0001$), mas não se diferencia de SAF ($Q = 0,793$; $p = 0,9410$). Do mesmo modo, Monocultura apresentou diferença altamente significativa em relação a SAF ($Q = 8,730$; $p = 0,0002$), mas não em relação à Pastagem ($Q = 0,0741$; $p = 0,9990$). A comparação entre Pastagem e SAF também indicou diferença estatisticamente significativa ($Q = 8,655$; $p = 0,0003$).

Esses resultados confirmam que os sistemas de uso do solo podem ser agrupados conforme a semelhança estatística de suas médias de biomassa viva. Floresta e SAF pertencem ao mesmo grupo, com valores médios baixos e sem diferença significativa entre si. Monocultura e Pastagem, por outro lado, formam um segundo grupo, também estatisticamente semelhante entre si, mas significativamente distinto dos sistemas mais biodiversos.

O teste de Tukey, portanto, valida as evidências de separação funcional entre sistemas simplificados e biodiversos indicadas anteriormente na análise da variância (ANOVA). Com os valores médios observados nas áreas experimentais. Floresta e SAF, apesar de apresentarem médias baixas, apresentam semelhança estatística entre si e diferem-se de Monocultura e Pastagem. Já Monocultura e Pastagem, com médias elevadas, também são semelhantes entre si, formando dois grupos distintos em termos estatísticos e ecológicos. O agrupamento revelado pelo teste de Tukey, portanto, reforça a estrutura funcional entre os sistemas biodiversos e simplificados, e valida os resultados da ANOVA, isto é, de que a biomassa viva difere entre os sistemas biodiversos (Floresta e SAF) e os sistemas simplificados (Monocultura e Pastagem) – reforçando a influência do uso do solo sobre essa variável.

A Figura 20 apresenta os intervalos de confiança das diferenças entre médias da variável Biomassa viva, conforme o teste de comparações múltiplas de Tukey (HSD). Observa-se que os pares Floresta vs. Monocultura, Floresta vs. Pastagem, Monocultura vs. SAF e Pastagem vs. SAF possuem intervalos que não cruzam a linha do zero, indicando diferenças estatisticamente significativas entre os grupos. Por outro lado, os pares Floresta vs. SAF e Monocultura vs. Pastagem apresentam intervalos que cruzam o zero, sugerindo ausência de diferença significativa. Esses resultados reforçam a existência de dois agrupamentos estatísticos: Floresta e SAF, por um lado, e Monocultura e Pastagem, por outro. Tais agrupamentos refletem padrões distintos na variável analisada e evidenciam o impacto do uso do solo sobre Biomassa viva.

Figura 20- Intervalos de confiança das diferenças entre médias (Tukey HSD).



Fonte: Elaboração própria, 2024.

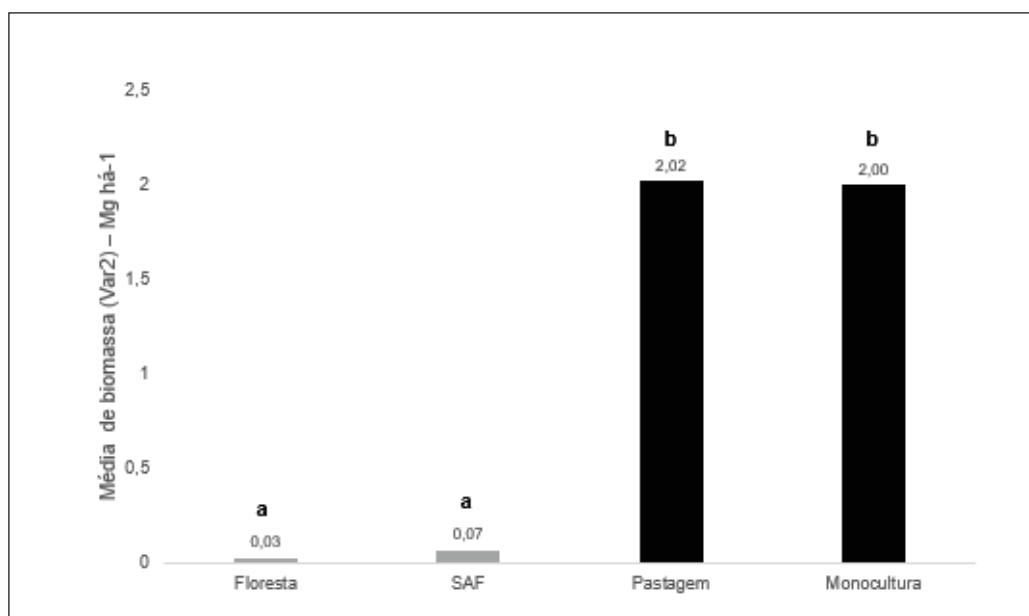
Nota: Comparações cujos intervalos não cruzam o zero indicam diferença estatisticamente significativa entre os grupos ($\alpha = 0,05$).

4.2.7 Agrupamentos e Gradiente de Complexidade

Com base nas comparações múltiplas realizadas, foi possível agrupar as áreas estudadas conforme a similaridade de seus efeitos sobre a variável biomassa viva. A Floresta e o SAF formaram o primeiro grupo, caracterizado por não apresentarem diferença estatisticamente significativa entre si ($p = 0,9410$; $Q = 0,793$), o que indica um padrão funcional semelhante entre esses sistemas mais complexos. Em

contrapartida, Monocultura e Pastagem compuseram um segundo grupo, também sem diferença significativa entre si ($p = 0,9990$; $Q = 0,0741$), representando sistemas simplificados com comportamento estatístico comum.

Figura 21- Agrupamentos e Gradiente de Complexidade.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Nota: O gráfico exibe as médias de biomassa viva (Biomassa viva) por área e os agrupamentos estatísticos do teste de Tukey. Letras iguais indicam ausência de diferença significativa.

A Figura 21, acima indicada, apresenta as médias de biomassa viva por sistema e os respectivos agrupamentos estatísticos. Verifica-se um padrão invertido em relação à biomassa morta: os sistemas biodiversos (Floresta e SAF) apresentaram as menores médias de biomassa viva, enquanto Monocultura e Pastagem, sistemas mais simplificados, mostraram as maiores médias. Tal resultado sugere que a estrutura da vegetação e a composição das espécies podem influenciar distintamente as formas de biomassa (morta vs. viva), revelando a complexidade ecológica envolvida.

A análise estatística conduzida – integrando ANOVA, teste de Tukey, medidas de variabilidade e magnitude de efeito – demonstrou de forma robusta que a variável biomassa viva é significativamente influenciada pelo uso do solo. Os resultados revelaram um padrão distinto daquele observado para Var1: as áreas de Monocultura e Pastagem apresentaram os maiores valores médios de biomassa viva, com diferenças estatisticamente significativas em relação às áreas de Floresta e SAF. A ausência de diferença significativa entre Floresta e SAF destaca novamente o

potencial dos sistemas agroflorestais em se comportar de maneira semelhante aos sistemas naturais, mesmo nesse contexto de biomassa viva reduzida.

Por outro lado, os sistemas simplificados, como Monocultura e Pastagem, concentraram os maiores valores de biomassa viva, possivelmente indicando maior acúmulo de biomassa vegetal em estágio de crescimento. Embora o padrão aqui identificado seja inverso ao observado para a biomassa morta, os resultados reforçam a influência direta do tipo de uso do solo sobre as diferentes formas de biomassa, revelando que variáveis ecológicas respondem de maneira diferenciada à complexidade estrutural dos sistemas.

A magnitude do efeito observada ($\omega^2 = 0,6373$) e o coeficiente de correlação intraclasse (ICC = 0,7008) conferem consistência às inferências realizadas, oferecendo base técnica sólida para o entendimento da dinâmica ecológica dos sistemas avaliados.

4.3 PARÂMETROS FITOSSOCIOLÓGICOS E DIVERSIDADE

A análise fitossociológica foi realizada por meio do *software* Fitopac 2.1 (SHEPHERD, 1995), utilizando o método de parcelas, com quatro unidades amostrais de 100 m² em cada sistema de uso da terra. Foram determinados os seguintes parâmetros: número de indivíduos (N), densidade absoluta (D), densidade relativa (DR), frequência absoluta (F), frequência relativa (FR), dominância absoluta (Do), dominância relativa (DoR) e o índice de valor de importância (IVI). Complementarmente, foram calculados o índice de diversidade de Shannon-Wiener (H') (SHANNON; WEAVER, 1949).

Nos SAFs, não foi realizada a medição da circunferência à altura do peito (CAP) para os indivíduos de café (*Coffea* sp.), por se tratarem de espécies arbustivas cujo CAP é geralmente inferior a 15 cm – valor abaixo do ponto mínimo adotado no protocolo de amostragem fitossociológica. Da mesma forma, os indivíduos de banana (*Musa* sp.) foram excluídos da análise por não possuírem estrutura lenhosa, o que inviabiliza sua inclusão nos parâmetros clássicos de densidade, dominância e área basal.

Apesar disso, foi realizada a contagem total dessas espécies em campo, somando 121 indivíduos de café e 95 indivíduos de banana, totalizando 216 indivíduos, o que evidencia a expressiva densidade de espécies produtivas no SAF.

No SAF, foram registrados 81 indivíduos pertencentes a 10 espécies distribuídas em 9 famílias. A densidade absoluta foi de 2025 indivíduos por hectare, com área basal total de 4279,438 cm². A dominância absoluta somou 106.985,900 cm², e o volume total foi de 26.457,69 cm³. A espécie *Eucalyptus* sp. destacou-se amplamente em todos os parâmetros estruturais, com 59,26% da densidade relativa, 100% de frequência absoluta e 54,37% de dominância relativa, resultando em um IVI de 133,63. As demais espécies apresentaram menor representatividade, como *Malpighia emarginata* (IVI 55,34) e *Sterculia apetala* (IVI 29,63).

Tabela 5- Espécies amostradas no SAF.

Família	Nome científico	Nome comum	Número de indivíduos
Anacardiaceae	<i>Mangifera indica</i>	Mangueira	2
Bignoniaceae	<i>Handroanthus albus</i>	ipê amarelo	1
	<i>Handroanthus</i> sp.	ipê-rosa	1
Fabaceae	<i>Bauhinia forficata</i>	pata de vaca	2
Malpighiaceae	<i>Malpighia emarginata</i>	Acerola	14
Malvaceae	<i>Sterculia apetala</i>	Xixá	6
Melastomataceae	<i>Pleroma granulosum</i>	Quaresmeira	1
Moringaceae	<i>Moringa oleifera</i>	Moringa	3
Myrtaceae	<i>Eucalyptus</i> sp.	Eucalipto	48
Rutaceae	<i>Citrus</i> sp	Citrus	3

Fonte: Elaboração própria, 2024.

No Fragmento Florestal, foram registrados 50 indivíduos, pertencentes a 24 espécies de 15 famílias. A densidade absoluta foi de 1250 indivíduos por hectare, com área basal total de 7674,53 cm² e dominância absoluta de 191.863,30 cm². O volume total foi de 78.091,60 cm³, valor superior ao registrado no SAF, mesmo com menor número de indivíduos. A estrutura florística foi mais equilibrada no fragmento, com menor dominância de espécies isoladas. Os maiores IVIs foram observados para *Gallesia integrifolia* (35,25), *Parapiptadenia rigida* (25,29) e *Trichilia pallida* (23,45), com distribuição mais homogênea entre as espécies.

Tabela 6- Espécies amostradas no Fragmento florestal

Família	Nome comum	Nome científico	Número de indivíduos
Bignoniaceae	ipê-felpudo	<i>Zeyheria tuberculosa</i>	2
Cannabaceae	Candiúva	<i>Trema micrantha</i>	6
Cordiaceae	louro pardo	<i>Cordia trichotoma</i>	3
Euphorbiaceae	Leiteiro	<i>Sapium glandulosum</i>	1
	Tapiá	<i>Alchornea glandulosa</i>	5
	laranjeira-do-mato	<i>Actinostemon concolor</i>	1
Fabaceae	Angico	<i>Parapiptadenia rigida</i>	3
	angico-branco	<i>Anadenanthera colubrine</i>	2
	Canafístla	<i>Peltophorum dubium</i>	2
	Ingá	<i>Inga marginata</i>	1
	Ingá	<i>Inga vera</i>	1
	Leucina	<i>Leucaena leucocephala</i>	1
	Sapuva	<i>Machaerium stipitatum</i>	2
Lecythidaceae	Jequitibá	<i>Cariniana legalis</i>	1
Meliaceae	trichilia pallida	<i>Trichilia pallida</i>	6
Myrtaceae	Pitanga	<i>Eugenia uniflora</i>	1
Phytolaccaceae	pau d'alho	<i>Gallesia integrifolia</i>	4
Rhamnaceae	uva-japonesa	<i>Hovenia dulcis</i>	1
Rutaceae	pau-de-cutia	<i>Esenbeckia grandiflora</i>	2
	pau-marfim	<i>Balfourodendron riedelianum</i>	1
Sapindaceae	camboatá vermelho	<i>Cupania vernalis</i>	1
Solanaceae	fumo bravo	<i>Solanum granulosoleprosum</i>	1
Urticaceae	Embaúba	<i>Cecropia pachystachia</i>	1
Verbenaceae	Tucaneira	<i>Citharexylum myrianthum</i>	1

Fonte: Elaboração própria, 2024.

O índice de diversidade de Shannon-Wiener (H') foi de 2,940 no Fragmento Florestal e 1,396 no SAF, demonstrando maior diversidade no fragmento – o que já era esperado por se tratar de um ecossistema de floresta secundária. A equabilidade, que mede a distribuição dos indivíduos entre as espécies, foi 0,925 no fragmento e 0,606 no SAF, expondo a dominância acentuada de poucas espécies neste último, especialmente de *Eucalyptus* sp.

Com base nos parâmetros fitossociológicos obtidos, foi possível identificar diferenças na biodiversidade de espécies entre o SAF e o Fragmento Florestal. No SAF, a estrutura florística caracteriza-se por uma forte presença de *Eucalyptus* sp., responsável por mais da metade da dominância relativa (54,37%) e da densidade relativa (59,26%). A predominância dessa espécie no SAF avaliado está diretamente

relacionada à sua função produtiva e ao manejo adotado. Além de seu valor econômico, essa espécie é amplamente utilizada pela sua alta taxa de crescimento e pela capacidade de fornecer grande quantidade de biomassa por meio das podas periódicas. O material lenhoso e foliar resultante dessas podas é frequentemente deixado no solo, contribuindo para a adição de matéria orgânica, melhoria da fertilidade e aumento do estoque de carbono no compartimento solo. Essa prática reforça o papel do *Eucalyptus* sp. não apenas como componente produtivo, mas também como elemento estratégico para o sequestro de carbono em sistemas agroflorestais, evidenciado pelo expressivo acúmulo de biomassa aérea e consequente estoque de carbono.

O Fragmento Florestal apresenta uma composição mais diversa e equilibrada, com 24 espécies distribuídas em 15 famílias, índice de diversidade de Shannon-Wiener mais elevado ($H' = 2,940$) e alta equabilidade (0,925). A ausência de uma espécie dominante e a distribuição mais homogênea entre as espécies contribuem para um sistema ecologicamente mais estável e resiliente. Esses resultados estão em consonância com Rachwal et al. (2023), que destacam o papel da alta diversidade e da presença de espécies nativas em múltiplos estratos na maximização do acúmulo de carbono.

A diferença observada na diversidade entre os sistemas era esperada, considerando que o SAF estudado é um ambiente manejado com finalidade produtiva, destinado principalmente ao cultivo agrícola. Nesse contexto, a seleção de espécies tende a priorizar aquelas com maior valor econômico ou funcional para o manejo, como o *Eucalyptus* sp., resultando, naturalmente, em menor diversidade florística quando comparado a áreas de vegetação nativa. Essa característica é inerente a sistemas agroflorestais voltados à produção, e reflete uma escolha estratégica associada à eficiência produtiva. Ainda assim, mesmo com essa composição mais direcionada, o SAF apresentou relevante capacidade de sequestro de carbono, indicando potencial para, mediante enriquecimento florístico e introdução de espécies nativas, ampliar sua diversidade e suas funções ecológicas.

4.4 CARBONO NA SERAPILHEIRA E BIOMASSA VIVA ARBUSTIVA

A Tabela 7 apresenta os valores de carbono acumulado por hectare (Mg C ha^{-1}), discriminados por compartimento da biomassa, sendo biomassa morta e

biomassa viva para cada tipo de uso do solo (tratamentos). Esses valores representam o somatório total das amostras coletadas em cada área, expressando diretamente a contribuição de cada compartimento para o estoque geral de carbono.

Os dados indicaram que o sistema de Floresta apresentou o maior estoque total de carbono, com 44,99 Mg C ha⁻¹, dos quais, 44,80 Mg C ha⁻¹ correspondem à biomassa morta e apenas 0,19 Mg C ha⁻¹ à biomassa viva, com CAP <15. O SAF aparece em seguida, com 34,53 Mg C ha⁻¹ no total, sendo 34,11 Mg C ha⁻¹ provenientes da biomassa morta e apenas 0,42 Mg C ha⁻¹ da biomassa viva. Essa similaridade com a floresta evidencia o potencial do SAF em manter processos de acúmulo de carbono comparáveis aos de ecossistemas naturais.

Por outro lado, os sistemas mais simplificados, como a Pastagem e a Monocultura, apresentaram um padrão inverso. Ambos acumulam a maior parte do carbono na biomassa viva (quando considerados apenas os indivíduos arbustivos), 12,13 e 12,00 Mg C ha⁻¹, respectivamente, com valores reduzidos na biomassa morta (9,66 e 4,19 Mg C ha⁻¹). Isso sugere que, embora haja produção de biomassa acima do solo, há menor deposição de resíduos e menor retenção de carbono no solo.

Tabela 7- Estoque de carbono por tratamento, considerando os compartimentos de biomassa morta e biomassa viva, com valores expressos em Mg C ha⁻¹.

Sistema	Carbono em Biomassa morta (Mg C ha ⁻¹)	Carbono em Biomassa viva (Mg C ha ⁻¹)	Total (Mg C ha ⁻¹)
Floresta (F)	44,80	0,19	44,99
SAF	34,11	0,42	34,53
Pastagem (P)	9,66	12,13	21,78
Monocultura (M)	4,19	12,00	16,19

Fonte: Elaboração própria, 2024.

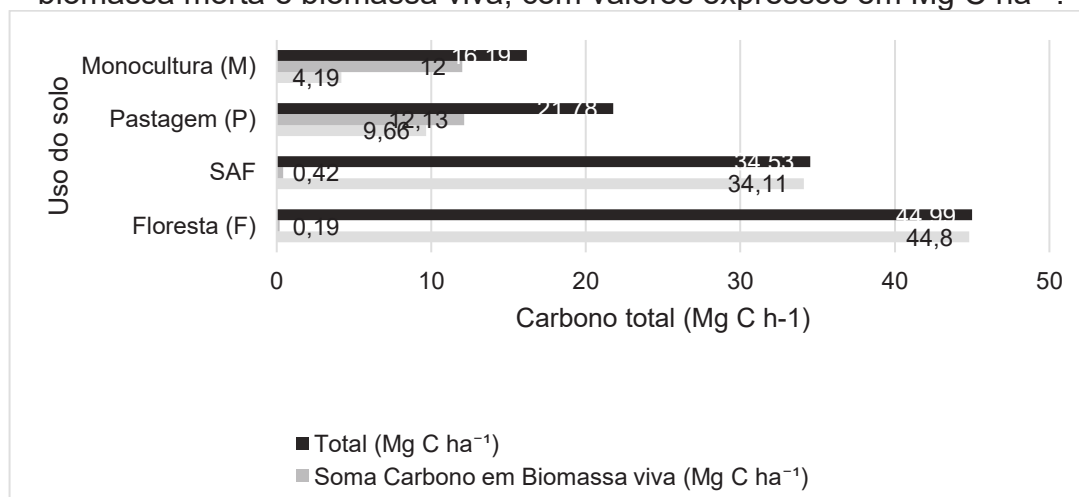
Nota: Os dados representam o somatório total das parcelas amostradas em cada tipo de uso do solo (Floresta, Sistema Agroflorestal – SAF, Pastagem e Monocultura), permitindo avaliar a contribuição de cada compartimento para o estoque total de carbono.

Esses resultados reforçam a importância de sistemas florestais e agroflorestais na retenção e estabilidade do carbono ao longo do tempo, ao mesmo tempo que atestam a vulnerabilidade dos sistemas simplificados à perda de matéria orgânica e carbono do ecossistema.

A Figura 22 apresenta o estoque total de carbono acumulado por hectare (Mg C ha⁻¹) nos diferentes usos do solo, discriminado entre os compartimentos de

biomassa morta e biomassa viva. Os dados correspondem à soma das parcelas amostradas em cada tratamento, representando o valor absoluto de carbono acumulado por sistema.

Figura 22- Estoque de carbono por tratamento, considerando os compartimentos de biomassa morta e biomassa viva, com valores expressos em Mg C ha^{-1} .



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Nota: Os dados representam o somatório total das parcelas amostradas em cada tipo de uso do solo (Floresta, SAF, Pastagem e Monocultura), permitindo avaliar a contribuição de cada compartimento para o estoque total de carbono.

A Tabela 8 apresenta a média de carbono estocado por hectare (Mg C ha^{-1}) em diferentes sistemas de uso do solo, distribuída entre dois compartimentos: biomassa morta e biomassa viva.

Tabela 8- Média de carbono por tratamento, considerando os compartimentos de biomassa morta e biomassa viva, a média por tratamento, com valores expressos em Mg C ha^{-1} .

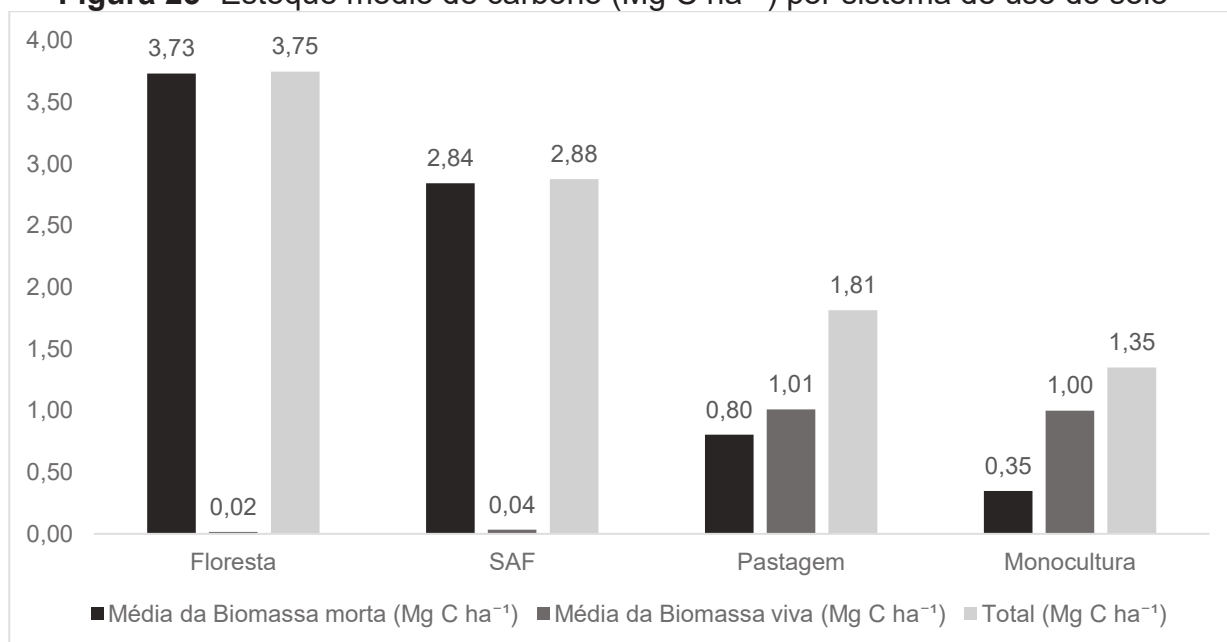
Sistema	Média da Biomassa morta (Mg C ha^{-1})	Média da Biomassa Viva (Mg C ha^{-1})	Total (Mg C ha^{-1})
Floresta	3,7330	0,016	3,749
SAF	2,8425	0,035	2,877
Pastagem	0,8048	1,010	1,814
Monocultura	0,3490	1,000	1,349

Fonte: Elaboração própria, 2024.

Observa-se que o fragmento florestal apresentou o maior estoque total de carbono ($3,749 \text{ Mg C ha}^{-1}$), com predominância da biomassa morta. Em seguida, o

SAF obteve um valor total de 2,877 Mg C ha⁻¹, também com maior contribuição da biomassa morta. Os sistemas de Pastagem e Monocultura apresentaram os menores estoques totais, sendo 1,814 Mg C ha⁻¹ e 1,349 Mg C ha⁻¹, respectivamente, com predomínio da biomassa viva.

Figura 23- Estoque médio de carbono (Mg C ha⁻¹) por sistema de uso do solo



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Nota: Considerando biomassa morta, biomassa viva e o total (Biomassa morta + Biomassa viva).

Os dados obtidos neste estudo indicaram uma diferença relativamente pequena no estoque de carbono na serapilheira entre o fragmento de floresta, com 3,73 Mg C ha⁻¹, e o sistema agroflorestal biodiverso, que apresentou o valor de 2,84 Mg C ha⁻¹. Já quando considerada a área de pastagem e monocultura, os valores mostraram-se inferiores, 1,814 Mg C ha⁻¹ e 1,349 Mg C ha⁻¹, respectivamente.

Esses resultados são consistentes com estudos anteriores, embora ligeiramente inferiores aos reportados em sistemas com maior tempo de formação ou maior acúmulo de resíduos vegetais. Por exemplo, Froufe et al. (2011) reportaram 4,41 Mg C ha⁻¹ como média em sistemas agroflorestais multiestrato (com 4, 8 e 16 anos), 5,94 Mg C ha⁻¹ em capoeiras (florestas secundárias) e 2,08 Mg C ha⁻¹ em pastagens degradadas, demonstrando que a diversidade estrutural influencia diretamente no acúmulo de carbono.

Estudos como o de Diniz (2015), que avaliou plantios de seringueira com cinco anos de idade, reportaram valores entre 1,22 e 2,17 Mg C ha⁻¹, obtidos por coleta

pontual, refletindo o estoque momentâneo da serapilheira depositada sobre o solo. De forma semelhante, Cotta et al. (2008) encontraram $1,67 \text{ Mg C ha}^{-1}$ em um sistema agroflorestal consorciado com cacau (6 anos) e seringueira (34 anos), também a partir de amostragem única. No estudo mais recente de Martinelli et al. (2024), sistemas agroflorestais biodiversos implantados em Bonito-MS apresentaram valores variando entre 3 e 5 Mg C ha^{-1} , porém, sem detalhamento metodológico que permitisse afirmar que esses dados se referiam ao estoque pontual ou produção anual; portanto, são tratados aqui como estoques momentâneos para fins comparativos.

Silva et al. (2023), por sua vez, realizaram coletas mensais durante 11 meses, o que lhes permitiu calcular a produção anual média de serapilheira. Os valores relatados foram de $10,74 \text{ t ha}^{-1}$ no sistema silvipastoril com eucalipto, $7,17 \text{ t ha}^{-1}$ na floresta estacional semidecidual e $1,01 \text{ t ha}^{-1}$ na pastagem em monocultivo. Com o objetivo de realizar uma comparação, esses valores foram convertidos pelo mesmo fator de 0,5, e os estoques de carbono estimados foram de 5,37, 3,59 e $0,51 \text{ Mg C ha}^{-1}$, respectivamente. Dessa forma, ao comparar os dados deste trabalho com os da literatura, é fundamental reconhecer se os valores correspondem a estoques pontuais ou à produção anual, a fim de evitar interpretações imprecisas sobre a produtividade e o potencial de acúmulo de carbono dos sistemas avaliados.

Tabela 9- Carbono na serapilheira (Mg C ha^{-1}) em diferentes sistemas de uso do solo, conforme dados deste estudo e de referências da literatura.

Referência	Sistema	Carbono na serapilheira (Mg C ha^{-1})	Observações
Este estudo (2025)	Floresta	3,73	Fragmento florestal
Este estudo (2025)	SAF	2,84	SAF biodiverso intensivo com ~5 anos
Froufe et al. (2011)	SAF multiestrata	4,41	Média dos SAFs com 4, 8 e 16 anos
Froufe et al. (2011)	Capoeira (Floresta secundária)	5,94	Média das capoeiras com 5, 20 e 30 anos
Froufe et al. (2011)	Pastagem degradada	2,08	Média entre diferentes níveis de degradação
Froufe et al. (2011)	Agricultura (pupunha, maracujá)	~1,61	Sistemas convencionais com adubação e defensivos
Silva et al. (2022)	Pastagem em monocultivo	0,51	Baixíssimo aporte de serapilheira
Silva et al. (2022)	Floresta Estacional Semidecidual	3,59	Estágio intermediário de regeneração
Silva et al. (2022)	Sistema silvipastoril com eucalipto	5,37	Sistema com grande produção de resíduos vegetais
Diniz (2015)	Seringueira (5 anos)	1,22 – 2,17	Monocultivo
Cotta et al. (2008)	SAF	1,67	SAF: Cacau (6 anos) + Seringueira (34 anos)
Martinelli et al. (2024)	SAF I a V	3 – 5	Safs biodiversos

Fonte: Elaboração própria, 2024.

Nota: Os valores refletem a influência do tipo de vegetação, manejo e estágio de desenvolvimento dos sistemas sobre o acúmulo de carbono na serapilheira.

Os resultados obtidos neste estudo, com valores de $3,73 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para a floresta e $2,84 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para o SAF biodiverso com aproximadamente cinco anos, estão em consonância com os valores reportados na literatura para estoques pontuais de serapilheira. Esses dados também se aproximam dos apresentados por Froufe et al. (2011), que identificaram valores de $4,41 \text{ Mg C ha}^{-1}$ em SAFs multiestrata, $5,94 \text{ Mg C ha}^{-1}$ em capoeiras, $2,08 \text{ Mg C ha}^{-1}$ em pastagens degradadas e aproximadamente $1,61 \text{ Mg C ha}^{-1}$ em áreas de agricultura convencional. Os resultados também são compatíveis com os encontrados por Martinelli et al. (2024) em SAFs biodiversos (3 a 5 Mg C ha^{-1}); superando os estoques observados por Cotta et al. (2008) ($1,67 \text{ Mg C ha}^{-1}$) e Diniz (2015) ($1,22$ a $2,17 \text{ Mg C ha}^{-1}$) em sistemas com seringueira.

Embora inferiores aos valores anuais estimados por Silva et al. (2023), que consideraram coletas mensais ao longo do ano e obtiveram de $0,51$ a $5,37 \text{ Mg C ha}^{-1}$ após conversão, os dados aqui apresentados demonstram que mesmo as estimativas pontuais são eficazes para identificar padrões de acúmulo de carbono associados à estrutura e ao manejo dos sistemas. De modo geral, os dados obtidos reforçam a relevância das florestas secundárias e dos sistemas agroflorestais biodiversos como

alternativas sustentáveis para aumento do estoque de carbono, especialmente em regiões de transição entre sistemas produtivos convencionais e áreas em processo de restauração.

As frações avaliadas incluíram: folhas (FL), estrutura lenhosa (EL), estrutura reprodutiva (ER) e miscelâneo (MS). Os dados foram organizados separadamente para a biomassa morta e a biomassa viva.

Tabela 10- Estoque de Carbono por Fração da Biomassa.

Compartmento	Fração	Soma (Mg C ha ⁻¹)	Média (Mg C ha ⁻¹)	Desvio Padrão
Biomassa morta	EL	36.213	0.754	0.763
Biomassa morta	ER	5.477	0.114	0.248
Biomassa morta	FL	43.992	0.916	0.843
Biomassa morta	MS	7.071	0.147	0.221
Biomassa viva	EL	9.093	0.189	0.299
Biomassa viva	ER	7.559	0.157	0.415
Biomassa viva	FL	7.854	0.163	0.266
Biomassa viva	MS	0.238	0.005	0.018

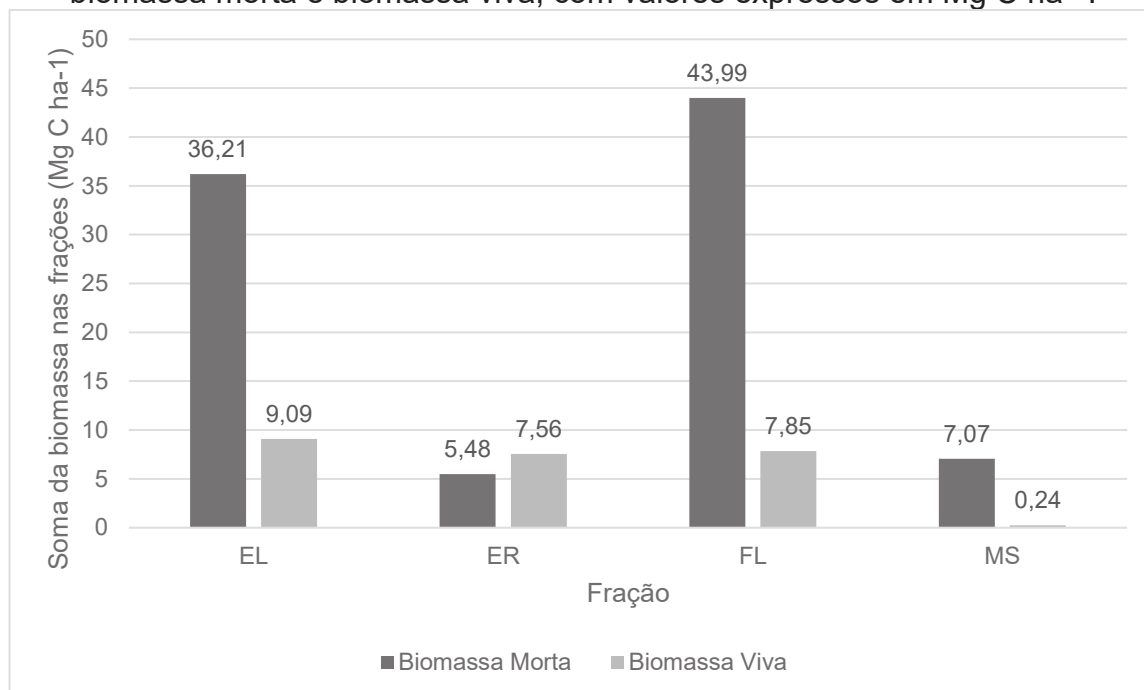
Fonte: Elaboração própria, 2024.

Nota: Valores de carbono acumulado por fração da biomassa (folhas – FL, estrutura lenhosa – EL, estrutura reprodutiva – ER e miscelâneo – MS), separados por compartimento (biomassa morta e viva).

Na biomassa morta, a maior contribuição ao estoque de carbono foi observada na fração de folhas (43,99 Mg C ha⁻¹), seguida pela estrutura lenhosa (36,21 Mg C ha⁻¹). As frações de miscelâneo e estrutura reprodutiva contribuíram com valores menores, de 7,07 Mg C ha⁻¹ e 5,48 Mg C ha⁻¹, respectivamente. Esses resultados refletem o acúmulo contínuo de serapilheira em sistemas florestais e agroflorestais, bem como a decomposição lenta de folhas e galhos finos que compõem a maior parte da biomassa morta superficial.

Por outro lado, a biomassa viva apresentou valores consideravelmente menores de carbono acumulado. A maior contribuição foi novamente da estrutura lenhosa (9,09 Mg C ha⁻¹), seguida das folhas (0,91 Mg C ha⁻¹), enquanto as frações de estrutura reprodutiva e miscelâneo apresentaram valores marginais. Essa distribuição indica que a vegetação viva de pequeno porte possui menor massa acumulada em termos absolutos, e que o carbono presente se encontra majoritariamente em tecidos de suporte estrutural.

Figura 24- Estoque de carbono por tratamento, considerando os compartimentos de biomassa morta e biomassa viva, com valores expressos em Mg C ha^{-1} .



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Nota: Os dados representam o somatório total das parcelas amostradas em cada tipo de uso do solo (Floresta, SAF, Pastagem e Monocultura), permitindo avaliar a contribuição de cada compartimento para o estoque total de carbono.

4.5 CARBONO NA BIOMASSA VIVA AÉREA

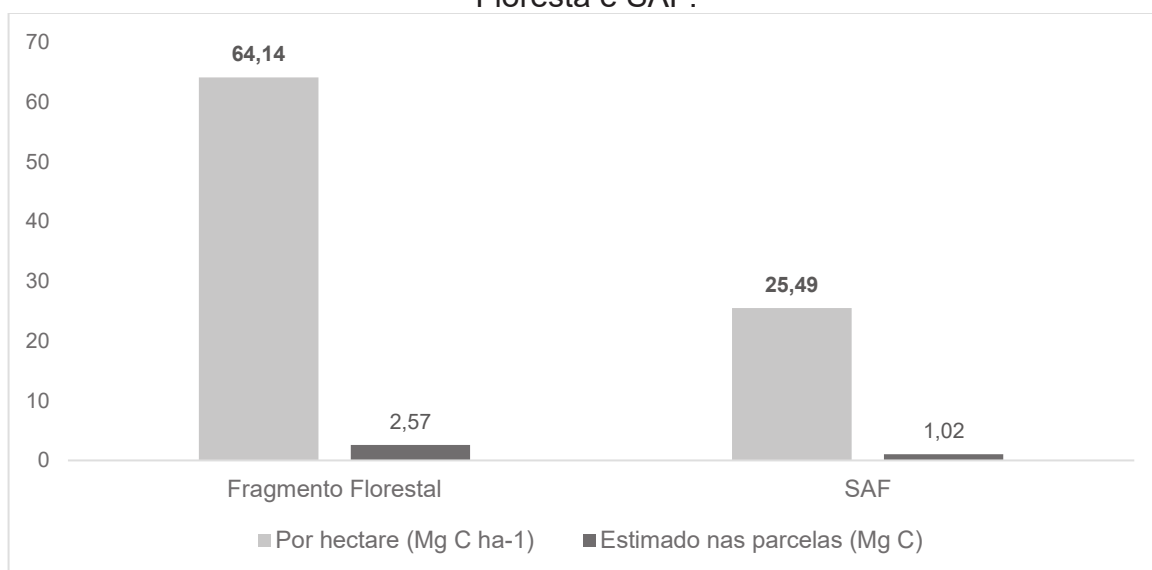
Foram amostradas quatro parcelas de 100 m^2 ($10 \times 10 \text{ m}$) por sistema, totalizando 0,04 hectares de área avaliada em cada uso. A quantificação do carbono estocado na biomassa aérea viva foi conduzida com base na aplicação de equações alométricas específicas para vegetações tropicais. Neste estudo, empregou-se a equação proposta por Arévalo et al. (2002), que estima a biomassa individual a partir do diâmetro à altura do peito (DAP).

Após a obtenção da biomassa por indivíduo, o estoque de carbono foi estimado pela aplicação de um fator de 0,5, assumindo-se que 50% da biomassa vegetal seca corresponde ao carbono armazenado (HIGUCHI; CARVALHO, 1994; KRAENZEL, 2002; SOARES; OLIVEIRA, 2002). A extrapolação para a unidade de hectare foi realizada a partir da divisão da biomassa obtida nas parcelas pela área amostrada total (0,04 ha), resultando na média da biomassa por unidade de área. Essa métrica é amplamente empregada em inventários florestais e avaliações de sequestro de carbono (BROWN, 1997; PEARSON et al., 2007), uma vez que reflete a densidade

de carbono estocada e permite sua projeção para áreas maiores, além de facilitar a análise comparativa entre diferentes sistemas de uso do solo.

No SAF, composto por espécies nativas e exóticas, como *Eucalyptus sp.*, *Malpighia emarginata* e *Sterculia apetala*, a biomassa total acumulada nas parcelas foi de 1.019,74 Mg, resultando em um estoque de carbono de 509,87 Mg. A extrapolação para um hectare produziu um valor estimado de 25,49 Mg C ha⁻¹. Por outro lado, o FF apresentou maior diversidade florística e indivíduos de maior porte, incluindo espécies como *Gallesia integrifolia*, *Parapiptadenia rigida* e *Anadenanthera colubrina*. Nesse sistema, a biomassa total nas parcelas foi de 5.255,02 Mg, denotando um estoque de carbono de 2.627,51 Mg. Considerando a área amostrada de 0,04 ha, o valor extrapolado foi de 65,68 Mg C ha⁻¹ (Figura 24 e Tabela 11).

Figura 25- Comparação entre o estoque total de carbono (Mg C) obtido na área amostrada (0,04 ha) e o estoque estimado por hectare (Mg C ha⁻¹) nos sistemas Floresta e SAF.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Tabela 11- Estimativas do estoque de carbono na biomassa aérea viva (em Mg C ha⁻¹) nos diferentes sistemas de uso do solo, calculadas com base nas equações alométricas propostas por Arévalo et al. (2002).

Sistema de Uso do Solo	Biomassa Total nas Parcelas (Mg)	Estoque de Carbono (Mg)	Área Amostrada (ha)	Estoque Estimado (Mg C ha ⁻¹)
Sistema Agroflorestal (SAF)	1.019,74	509,87	0,04	25,49
Fragmento Florestal (FF)	5.255,02	2.627,51	0,04	65,68

Fonte: Elaboração própria, 2024.

Neste estudo, a biomassa viva, composta por vegetação herbácea/arbustiva de sub-bosque representou um estoque de carbono muito baixo nos sistemas florestal e agroflorestal, em contraste com os sistemas simplificados. No fragmento de Floresta, o carbono na vegetação viva de sub-bosque foi praticamente desprezível (~0,016 Mg C ha⁻¹), e no SAF biodiverso de ~5 anos foi ligeiramente maior, porém ainda mínimo (~0,035 Mg C ha⁻¹). Esses valores refletem a baixa densidade de plantas jovens/herbáceas sob dosséis florestais mais fechados, onde a maior parte do carbono acima do solo está estocado na biomassa arbórea de maior porte, não incluída nas medições de indivíduos com CAP<15 cm.

É importante salientar que a biomassa dos indivíduos de cafeeiro e bananeira presentes no SAF não foi quantificada neste estudo. Em contrapartida, nos sistemas abertos e simplificados, a biomassa viva herbácea constituiu a fração dominante do carbono acima do solo: na Pastagem, o estoque médio de carbono na vegetação viva foi de ~1,01 Mg C ha⁻¹, e na Monocultura, cerca de 1,00 Mg C ha⁻¹. Nesses dois sistemas, praticamente todo o carbono vegetal está na cobertura herbácea (capim ou cultura), dado que não há árvores grandes e a pouca deposição de serapilheira.

Na pesquisa conduzida por Froufe et al. (2011), que avaliou SAFs multiestratos, capoeiras e sistemas agrícolas convencionais no Alto Vale do Ribeira (SP), os estoques totais de carbono nos SAFs variaram entre 66,15 e 84,58 Mg C ha⁻¹, com média de 75,37 Mg C ha⁻¹, considerando os compartimentos de solo, serapilheira, vegetação herbácea e biomassa arbórea. Desse total, a biomassa aérea arbórea correspondeu a 32,36 Mg C ha⁻¹, dado ligeiramente superior ao valor obtido neste trabalho (25,49 Mg C ha⁻¹) para o SAF analisado.

Essa diferença pode ser atribuída à diversidade estrutural e funcional dos SAFs avaliados. Froufe et al. (2011) trabalharam com SAFs em diferentes idades (4, 8 e 16 anos), implantados com técnicas agroecológicas e alta diversidade de espécies – fato

esse que potencializa o acúmulo de carbono nos diversos estratos da vegetação. No que diz respeito ao Fragmento Florestal, o estoque de carbono na biomassa arbórea obtido neste estudo ($65,68 \text{ Mg C ha}^{-1}$) aproxima-se do valor médio reportado pelos autores para capoeiras maduras ($70,82 \text{ Mg C ha}^{-1}$).

Nos sistemas de uso do solo classificados como pastagem e monocultura, a ausência de indivíduos arbóreos com diâmetro à altura do peito (DAP) $\geq 5 \text{ cm}$ inviabilizou a aplicação das equações alométricas utilizadas para estimativa de biomassa aérea viva. Como resultado, não foi possível estimar o estoque de carbono arbóreo nesses compartimentos, o que se assemelha àquilo reportado por Froufe et al. (2011), cujo estudo também indicou a ausência de valores determinados (“ND”) para a biomassa aérea arbórea na pastagem.

Essa limitação metodológica, apesar de esperada, reflete a estrutura simplificada desses sistemas, nos quais predomina a vegetação herbácea de baixo porte e rápida ciclagem. Isso reforça a assertiva de que sistemas simplificados, como pastagens e monoculturas, apresentam baixa capacidade de sequestro de carbono na biomassa aérea, ao contrário dos sistemas agroflorestais e florestais, que exibem maior complexidade estrutural e capacidade de acumulação de biomassa lenhosa ao longo do tempo.

Montagnini e Nair (2004) – a partir de uma síntese de estudos de campo e observações empíricas, tendo como base as taxas médias de crescimento arbóreo e produção de madeira por hectare, com a aplicação do fator de conversão de 50% da biomassa seca em carbono –, estimaram que sistemas agroflorestais podem acumular entre 9 e 63 Mg C ha^{-1} . Esses valores representam estimativas de estoque de carbono na biomassa aérea viva de diferentes tipos de sistemas agroflorestais (SAFs), implantados em zonas ecológicas distintas. Tais estimativas referem-se a cenários típicos observados em SAFs localizados em regiões semiáridas (9 Mg C ha^{-1}), subúmidas (21 Mg C ha^{-1}), úmidas tropicais (50 Mg C ha^{-1}) e temperadas (63 Mg C ha^{-1}).

A estimativa de $25,49 \text{ Mg C ha}^{-1}$ obtida no SAF analisado neste estudo está abaixo do valor de 50 Mg C ha^{-1} citado por Montagnini e Nair (2004) para regiões tropicais úmidas. Essa diferença é coerente quando se considera que os valores apresentados por aqueles autores foram estimados para SAFs com até 20 anos de idade, enquanto o sistema avaliado neste trabalho possui apenas cinco anos de implantação.

Para Montagnini e Nair (2004), o acúmulo de carbono na biomassa aérea viva tende a ocorrer de forma gradual ao longo do tempo. Dessa forma, o valor encontrado nesta pesquisa reflete um estágio inicial de desenvolvimento estrutural e funcional do sistema, com potencial de incremento significativo no estoque de carbono nos anos subsequentes. Isso justifica o uso do valor atual como uma linha de base para monitoramento de longo prazo, assim como reforça a importância dos SAFs enquanto alternativas viáveis de restauração produtiva e mitigação climática, desde que manejados adequadamente ao longo do tempo.

Os resultados obtidos para o estoque de carbono na biomassa aérea viva (25,49 Mg C ha⁻¹ no SAF e 65,68 Mg C ha⁻¹ no fragmento florestal) reforçam as premissas do artigo de Paustian et al. (2016), que destaca o papel dos ecossistemas com espécies arbóreas na deposição contínua de matéria orgânica ao solo. Embora o artigo enfoque o carbono orgânico do solo, é evidente que a presença de vegetação arbórea estruturada está associada à manutenção e ampliação do estoque de carbono no solo, por meio do aporte de serapilheira e raízes. Em contraste, sistemas simplificados, como pastagens e monocultivos, tendem a interromper esse fluxo, favorecendo a perda de carbono do solo e reduzindo sua resiliência frente às mudanças climáticas. Assim, os estoques de carbono na biomassa aérea, mesmo não incluídos diretamente no artigo, configuram-se como indicadores complementares e essenciais na avaliação integrada de sistemas sustentáveis de uso da terra.

4.6 SOMA DO CARBONO

A quantificação integrada do estoque de carbono nos diferentes sistemas de uso do solo – Floresta, SAF, Pastagem e Monocultura – foi obtida pela soma dos valores de carbono acumulado na biomassa morta, biomassa viva e biomassa viva aérea (indivíduos com CAP ≥ 15 cm). Essa abordagem permite uma avaliação mais abrangente da capacidade dos sistemas de armazenar carbono, integrando desde a fração superficial da vegetação (serapilheira e indivíduos jovens), até os estoques representados por árvores adultas. Os dados consolidados estão dispostos na Tabela 12.

Para fins de padronização e comparabilidade entre os compartimentos analisados, os valores de carbono referentes à biomassa viva aérea foram extrapolados para uma base de 1 hectare (Mg C ha⁻¹), considerando que a área

efetivamente amostrada foi de 0,04 ha em cada sistema. Essa extrapolação permite alinhar os resultados com os valores obtidos para a biomassa morta e viva arbustiva, que também foram expressos por hectare.

A análise integrada do carbono nos sistemas de uso do solo revela diferenças marcantes na capacidade de sequestro de carbono conforme a complexidade estrutural e diversidade funcional dos sistemas. No presente estudo, o maior estoque total de carbono foi observado no Fragmento Florestal, com 69,42 Mg C ha⁻¹, seguido pelo SAF, com 28,37 Mg C ha⁻¹, enquanto os sistemas simplificados, como pastagem e monocultura, apresentaram os menores valores, respectivamente 1,81 e 1,35 Mg C ha⁻¹.

Tabela 12- Estoque total de carbono por uso do solo, considerando os compartimentos de biomassa morta, biomassa viva e biomassa viva aérea. (Valores expressos em Mg C ha⁻¹)

Sistema de Uso do Solo	Biomassa Morta	Biomassa Viva	Biomassa Viva Aérea	Total
Floresta	3,7330	0,016	65,68	69,42
SAF	2,8425	0,035	25,49	28,37
Pastagem	0,8048	1,010	–	1,81 ¹
Monocultura	0,3490	1,000	–	1,35 ¹

Fonte: Elaboração própria, 2024.

Nota: ¹ Para Pastagem e Monocultura, não foram registrados dados de biomassa viva aérea com CAP ≥ 15 cm, portanto os valores representam apenas biomassa morta e viva arbustiva.

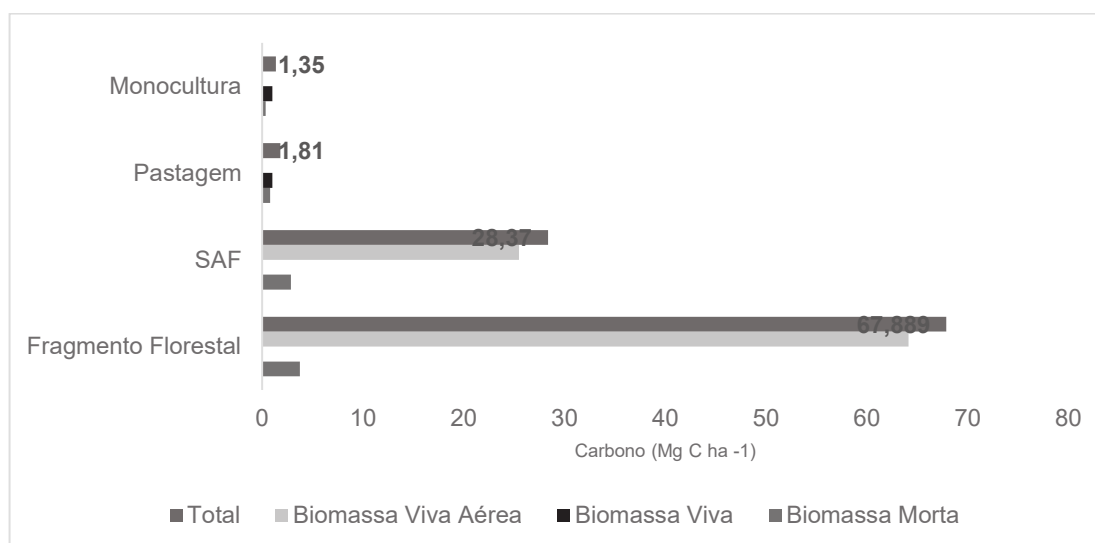
O Fragmento Florestal apresentou o maior estoque total de carbono, com 69,42 Mg C ha⁻¹. Esse valor elevado está associado a uma maior complexidade estrutural do sistema, expressa na presença de múltiplos estratos verticais, diversidade florística e maior tempo de recuperação ecológica – características que favorecem o acúmulo de biomassa e a estabilidade do ecossistema. A acumulação de carbono nesse tipo de sistema está diretamente relacionada à sua função ecológica como sumidouro de carbono, além de sua relevância na manutenção dos ciclos biogeoquímicos e da biodiversidade.

O SAF, por sua vez, apresentou um estoque de 28,37 Mg C ha⁻¹, valor considerável para um sistema antrópico voltado à produção agrícola. O SAF analisado caracteriza-se por alta densidade de plantio e diversidade funcional, reunindo espécies exóticas de crescimento acelerado, como *Eucalyptus* sp., e frutíferas tropicais, como *Malpighia emarginata*, integradas a espécies nativas. Essa

configuração favorece a ocupação eficiente do espaço vertical e a produtividade primária líquida elevada, o que também explica o acúmulo expressivo de biomassa em um curto intervalo de tempo.

Nos sistemas simplificados, como Pastagem e Monocultura, os estoques de carbono foram significativamente menores, totalizando, respectivamente, 1,81 Mg C ha⁻¹ e 1,35 Mg C ha⁻¹. Tais sistemas apresentam baixa diversidade estrutural e funcional, com predomínio de espécies herbáceas ou arbustivas de ciclo curto e ausência de estratificação vertical, o que limita a acumulação de biomassa aérea e a capacidade de sequestro de carbono. Um ponto que vale frisar é que a área de monocultura se encontrava em pousio, o que poderia implicar em subestimação do estoque total de carbono real do sistema. Do ponto de vista ecológico, esses ambientes refletem estados de menor complexidade e estabilidade, com reduzida capacidade de provisão de serviços ecossistêmicos, como a regulação do clima e a ciclagem de nutrientes.

Figura 26- Estoque total de carbono por compartimento e sistema de uso do solo.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Estes resultados reforçam a relevância dos sistemas com maior diversidade e estrutura arbórea no acúmulo e estabilidade do carbono. O estoque elevado de carbono na biomassa aérea da Floresta e do SAF indica não apenas o potencial de mitigação das mudanças climáticas, mas também a importância de manter e recuperar áreas com vegetação nativa e a necessidade do manejo sustentável em áreas de produção agrícola. O contraste entre esses sistemas e os modelos convencionais

(Monocultura e Pastagem) evidenciam os efeitos da intensificação agrícola sobre o ciclo do carbono, com redução expressiva dos estoques, especialmente quando há substituição de vegetação florestal por cultivos anuais.

Froufe et al. (2011) identificaram, na região do Alto Vale do Ribeira (SP), estoques totais de carbono da ordem de 115,78 Mg ha⁻¹ para capoeiras, 75,37 Mg ha⁻¹ para SAFs, 47,07 Mg ha⁻¹ para áreas agrícolas convencionais e 36,01 Mg ha⁻¹ para pastagens. A discrepância entre os valores obtidos para os SAFs no presente estudo (28,37 Mg C ha⁻¹) e os relatados de Froufe et al. (2011) (75,37 Mg C ha⁻¹) pode ser atribuída a fatores como tempo de implantação dos sistemas, composição florística, densidade de plantio e exclusão de espécies economicamente relevantes (e.g., *Musa* sp., *Coffea arabica*) da quantificação de biomassa, além do carbono armazenado no solo, que foi avaliado no estudo dos autores.

Ainda sobre o mesmo estudo, os SAFs avaliados apresentavam idades superiores (até 16 anos) e manejo agroecológico consolidado, o que pode ter favorecido maiores estoques. É relevante salientar que, mesmo considerando os compartimentos de biomassa morta e viva arbustiva, os estoques de carbono observados nos sistemas de pastagem (1,81 Mg C ha⁻¹) e monocultura (1,35 Mg C ha⁻¹) deste estudo são significativamente inferiores aos relatados por Froufe et al. (2011), que encontraram estoques totais de 36,01 Mg C ha⁻¹ em pastagens e 47,07 Mg C ha⁻¹ em áreas agrícolas convencionais. No entanto, é importante destacar que, segundo os autores, a maior parte desse carbono encontra-se armazenada no solo – 33,92 Mg C ha⁻¹ na pastagem e 38,25 Mg C ha⁻¹ na agricultura – sugerindo que, embora os sistemas simplificados apresentem baixa capacidade de acúmulo de biomassa aérea, o solo ainda funciona como o principal compartimento de retenção de carbono nesses contextos.

Rachwal et al. (2023) analisaram sistemas de cultivo de erva-mate sombreada e sob pleno sol (monocultura) na região Sul do Brasil. Os autores identificaram estoques de carbono na biomassa vegetal variando entre 40 e 95 Mg C ha⁻¹, valores que correspondem à soma dos compartimentos da vegetação, ou seja, parte aérea, raízes e serapilheira. Esses estoques mais elevados foram observados principalmente nos sistemas sombreados, onde a presença de espécies arbóreas nativas, como *Araucaria angustifolia* e diversas espécies de canelas, contribuiu significativamente para o acúmulo de carbono. O predomínio de árvores de maior porte e a presença de múltiplos estratos favorecem o armazenamento de carbono em maior escala,

reforçando a tendência observada neste estudo, no qual os sistemas com maior complexidade estrutural apresentaram estoques superiores de carbono na biomassa aérea.

Apesar da diferença entre os valores obtidos por Rachwal et al. (2023) e os observados na presente análise, ambos resultados convergem ao demonstrar que os sistemas agroflorestais apresentam estoques de carbono significativamente superiores aos de sistemas simplificados, como pastagens e monoculturas. Essa evidência reforça o papel dos SAFs como estratégia eficaz, que contribui para o aumento da resiliência ecológica e a provisão de serviços ecossistêmicos.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que sistemas agroflorestais biodiversos, quando bem planejados e manejados, são alternativas viáveis e sustentáveis para o armazenamento de carbono, aproximando-se dos padrões de fragmentos florestais naturais. Em contraste, sistemas simplificados – como monoculturas e pastagens – apresentam baixa eficiência na retenção de carbono, destacando a urgência de repensar estratégias de uso do solo. Os achados desta pesquisa oferecem suporte técnico-científico para políticas públicas que promovam modelos produtivos sustentáveis, conciliando conservação ambiental e segurança alimentar.

REFERÊNCIAS

- ALTIERI, M. A. Agroecología: principios y estrategias para diseñar sistemas agrarios sustentables. In: _____. *Agroecología: el camino hacia una agricultura sustentable*, v. 34, 2002.
- ANDRADES, T. O. de; GANIMI, R. N. Revolução verde e a apropriação capitalista. *CES Revista*, v. 21, n. 1, p. 43-56, 2007.
- ARCO-VERDE, M. F.; AMARO, G. C. *Metodologia para análise da viabilidade financeira e valoração de serviços ambientais em sistemas agroflorestais*. 2015.
- AREVALO, L. A.; ALEGRE, J. C.; VILCAHUAMAN, L. J. M. *Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra*. 2002.
- AZEVEDO, A. D. et al. Estoque de carbono em áreas de restauração florestal da Mata Atlântica. *Floresta*, v. 48, n. 2, 2018.
- BAEDE, A. P. M.; AHLONSOU, E.; DING, Y.; SCHIMEL, D. In: HOUGHTON, J. T. et al. (ed.). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- BALVANERA, P.; COTLER, H. Acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta Ecológica*, n. esp., n. 84-85, 2007.
- BATISTA, D. B. et al. Aporte de serapilheira e teor de carbono orgânico em um fragmento florestal urbano. *Nature and Conservation*, v. 13, n. 4, p. 22-30, 2020.
- BERNOUX, M. et al. Brazil's soil carbon stocks. *Soil Science Society of America Journal*, v. 66, p. 888-896, 2002.
- BERNOUX, M. et al. Gases de efeito estufa e estoque de carbono nos solos: inventário do Brasil. *Caderno de Ciência & Tecnologia*, Brasília, v. 22, n. 1, p. 235-246, 2005.
- BERTRAND, G. *Paisagem e geografia física global: esboço metodológico*. Tradução: O. Cruz. São Paulo: Universidade de São Paulo, Caderno de Ciências da Terra, 1971.
- BEUTLER, A. N. et al. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, p. 829-834, 2002.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- BRANCO, A. F. V. C. et al. Avaliação da perda da biodiversidade na Mata Atlântica. *Ciência Florestal*, v. 31, p. 1885-1909, 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Projeções do agronegócio: Brasil 2017/18 a 2027/28 – projeções de longo prazo*. Brasília: MAPA, 2018.

BROWN, G. G. et al. *Biodiversidade da fauna do solo e sua contribuição para os serviços ambientais*. 2015.

BURKHARD, B.; MAES, J. (ed.). *Mapping Ecosystem Services*. Sofia: Pensoft Publishers, 2017.

CARVALHO, J. L. N. et al. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 277-290, 2010.

CASSOL, P. C. et al. Alterações no carbono orgânico do solo de campo natural submetido ao plantio de *Pinus taeda* em três idades. *Ciência Florestal*, v. 29, n. 2, p. 545-558, 2019.

CERRI, C. C. et al. Challenges and opportunities of soil carbon sequestration in Latin America. In: LAL, R. et al. *Carbon sequestration in soils of Latin America*. New York: Haworth, 2006. p. 41-47.

CHAGAS, E. et al. Decomposição e liberação de nitrogênio, fósforo e potássio de resíduos da cultura do feijoeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p. 723-729, 2007.

CIOTTA, M. N. et al. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1161-1164, 2003.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. *Nosso futuro comum*. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Fundação Getúlio Vargas, 1991.

Disponível em:

https://www.academia.edu/39001224/Nosso_Futuro_Comum_relato%C3%B3rio_brun_dlandt. Acesso em: 12 abr. 2025.

COOK, R. L. et al. Soil carbon stocks and forest biomass following conversion of pasture to broadleaf and conifer plantations in southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 324, p. 37-45, 2014.

CORREIA, M. E. F.; ANDRADE, A. G. Formação de serapilheira e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (org.). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 197-225.

COSTA, C. C. de A; OLIVEIRA, F. L. Polinização: serviços ecossistêmicos e o seu uso na agricultura. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 8, n. 3, p. 1, 2013.

COSTA, E. A.; GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. S. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 7, p. 1185-1191, 2006.

D'ANDRÉA, A. F. et al. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, p. 179-186, 2004.

DÍAZ, S. et al. The IPBES Conceptual Framework — connecting nature and people. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 14, p. 1–16, 2015.

FEISTAUER, D. et al. *Seqüestro de carbono de um sistema agroflorestal com bracatinga (Mimosa scabrella Benth) na região metropolitana de Curitiba-PR*. 2004. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/310127>. Acesso em: 12 abr. 2025.

FREITAS, I. C. et al. Carbono no solo, acúmulo e qualidade da serapilheira em sistemas de produção familiar. *Floresta*, v. 46, n. 1, p. 31-38, 2016.

GARCIA, J. R. et al. Agricultura familiar de baixa emissão de carbono no Brasil. *Revista de Política Agrícola*, v. 31, n. 4, p. 119, 2022.

GROOT, R. et al. A short history of the ecosystem services concept. In: BURKHARD, B.; MAES, J. (ed.). *Mapping Ecosystem Services*. Sofia: Pensoft Publishers, 2017. p. 374.

GUO, L. B.; GIFFORD, R. M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, v. 8, n. 4, p. 345-360, 2002.

HAGGAR, J. et al. Contribution of agroforestry systems to sustaining biodiversity in fragmented forest landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 283, p. 106567, 2019.

HEAL, O. W.; ANDERSON, F. M.; SWIFT, M. F. Plant litter quality and decomposition: an historical overview. In: CADISCH, G.; GILLER, K. E. (ed.). *Driven by nature*. Cambridge: CAB International, 1997. p. 3-32.

HERMAN, J. D. et al. Climate adaptation as a control problem: review and perspectives on dynamic water resources planning under uncertainty. *Water Resources Research*, v. 56, n. 2, p. e24389, 2020.

HIGUCHI, N. et al. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: *Emissão x Seqüestro de CO₂ — Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil*. 1995. p. 125-154.

HUGUENIN, L.; MEIRELLES, R. M. S. Do período colonial à COP26: breve resgate histórico sobre as mudanças climáticas relacionadas ao uso da terra no Brasil. *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, v. 17, n. 5, p. 132-149, 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. *Sixth Assessment Report – Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Working Group II Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report. Geneva: IPCC, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>. Acesso em: 12 abr. 2025.

IPCC. Summary for Policymakers. In: SHUKLA, P. R. et al. (ed.). *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. In press, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc>. Acesso em: 12 abr. 2025.

KRAENZEL, M. et al. Carbon storage of harvest-age teak (*Tectona grandis*) plantations, Panama. *Forest Ecology and Management*, v. 173, n. 1-3, p. 213-225, 2003.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, v. 304, p. 1623-1627, 2004.

LE QUÉRÉ, C. et al. Global carbon budget 2018. *Earth System Science Data Discussions*, v. 2018, p. 1-3, 2018.

LEITÃO FILHO, H.; PAGANO, S. N. *Ecologia da Mata Atlântica em Cubatão, SP*. São Paulo: Editora UNESP; Fundação para o Desenvolvimento da UNESP, 1993.

LEITE, L. F. C. et al. Total C and N storage and organic C pools of a Red-Yellow Podzolic under conventional and no tillage at the Atlantic Forest Zone, south-eastern Brazil. *Soil Research*, v. 41, n. 4, p. 717-730, 2003.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Química Nova*, v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005.

MAGALHAES, S. S. A.; RAMOS, F. T.; WEBER, O. L. S. Estoques de carbono em Latossolo após trinta e oito anos sob diferentes sistemas de cultivo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 20, p. 85-91, 2016.

MAPBIOMAS. *Projeto MapBiomas – Coleção 6.0 da série anual de qualidade da pastagem do Brasil*. Disponível em: https://mapbiomas.org/colecoesmapbiomas1?cama_set_language=pt-BR. Acesso em: 26 nov. 2025.

MARQUES, A. C. O. et al. A contribuição da agricultura familiar na produção agropecuária do Brasil a partir do censo agropecuário do ano de 2006. In: JORNADA DO TRABALHO, 21., 2011, São Paulo. *Anais...*. São Paulo: [s. n.], 2011.

MARTIN-NETO, L. et al. *Estrutura e natureza química da matéria orgânica do solo*. 2023.

- MARTINS, S. V.; RODRIGUES, R. R. Produção de serapilheira em clareiras de uma floresta estacional semidecidual no município de Campinas, SP. *Brazilian Journal of Botany*, v. 22, p. 405-412, 1999.
- MAZOYER, M.; ROUDART, L. *Histórias das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea*. São Paulo: UNESP, 2010.
- MELO, F. P. L. et al. On the hope for biodiversity-friendly tropical landscapes. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 28, n. 8, p. 462-468, 2013.
- MIGUEL, J. C. H. Negacionismo climático no Brasil. *Revista Coletiva*, Dossiê 27, Crise Climática, 2020.
- MIKHAILOVA, I. Sustentabilidade: evolução dos conceitos teóricos e os problemas da mensuração prática. *Economia e Desenvolvimento*, 2004.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT – MEA. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- MOREIRA, C. Fotossíntese. *Revista de Ciência Elementar*, v. 1, n. 1, 2013.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2006.
- MOREIRA, K. S. et al. A evolução da legislação ambiental no contexto histórico brasileiro. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 2, 2021.
- MOTTER, A. F. C. Monocultura da eficiência capitalista. *Revista Espaço Acadêmico*, v. 9, n. 107, [s. p.], [200-].
- OLIVEIRA, R. E. *Aspectos da dinâmica de um fragmento florestal em Piracicaba-SP: silvigênese e ciclagem de nutrientes*. 1997. 85 f. Dissertação (Mestrado) – ESALQ/USP, Piracicaba, SP, 1997.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. ‘Code red for humanity’. *Climate and Environment*, 2021. Disponível em: <https://news.un.org/en/story/2021/08/1097362>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- PALUDO, R.; COSTABEBER, J. A. Sistemas agroflorestais como estratégia de desenvolvimento rural em diferentes biomas brasileiros. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 7, n. 2, p. 63–76, 2012.
- PRIMIERI, S.; MUNIZ, A. W.; LISBOA, H. M. Dinâmica do carbono no solo em ecossistemas nativos e plantações florestais em Santa Catarina. *Floresta e Ambiente*, v. 24, 2017.
- RADOMSKI, M. I.; RIBASKI, J. *Produção, conteúdo de nutrientes e estoque de carbono da serapilheira em sistema silvipastoril com Corymbia citriodora*. 2012. Disponível em:

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/941876/1/2012M.IzabelCLS APPSProducao.pdf>. Acesso em: 20 set. 2025.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p. 1609-1623, 2007.

RESCK, D. V. S. et al. Dinâmica da matéria orgânica no Cerrado. In: SANTOS, G. A. et al. (ed.). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 359-417.

RICKLEFS, R. E. *A economia da natureza*. 6. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010.

ROMEIRO, A. R. Desenvolvimento sustentável: uma perspectiva econômico-ecológica. *Estudos Avançados*, v. 26, p. 65-92, 2012.

SALTON, J. C. et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 11-21, 2008.

SAMPAIO, N. N.; CHAVES, C. C. S.; FERREIRA, A. F. Redução de emissões de gases do efeito estufa por desmatamento evitado – REDD+ na Lei do Amazonas (4.266/2015) e a Convenção-Quadro sobre Mudanças do Clima. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 9, n. 4, p. 1241-1256, 2023.

SANDERSON, E. W. et al. The human footprint and the last of the wild: the human footprint is a global map of human influence on the land surface, which suggests that human beings are stewards of nature, whether we like it or not. *BioScience*, v. 52, n. 10, p. 891-904, 2002.

NÚCLEO ESTADUAL DO PARANÁ – SBCE. *Cartilha de solos do norte do Paraná*. Londrina: SBCE-NEPAR, 2024. Disponível em: <https://sbce-nepar.org.br/wp-content/uploads/2024/06/Cartilha-solos-norte-PR-versao-final.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2025.

SCHMIDT, A. H. et al. Agricultural land use doubled sediment loads in western China's rivers. *Anthropocene*, v. 21, p. 95-106, 2018.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA – SEEG. *Emissões do setor de agropecuária*. São Paulo: Observatório do Clima, 2018. Disponível em: https://admin.imaflora.org/public/media/biblioteca/Relatorios_SEEG_2018-Agro_Final_v1.pdf. Acesso em: 23 abr. 2025.

SHANNON, C. E.; WEAVER, W. *The mathematical theory of communication*. Urbana: University of Illinois Press, 1949.

SHEPHERD, G. J. *Fitopac 2.1: Programa para levantamento e análise de dados fitossociológicos*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1995.

SILVA, M. S. C. et al. Estoque de serapilheira e atividade microbiana em solo sob sistemas agroflorestais. *Floresta e Ambiente*, v. 19, p. 431-441, 2012.

SILVA, R. R. *Qualidade do solo em função de diferentes sistemas de manejo na região Campos das Vertentes, Bacia Alto Rio Grande-MG*. 2001. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

SMILEY, G. L.; KROSCHEL, J. Temporal change in carbon stocks of cocoa–gliricidia agroforests in Central Sulawesi, Indonesia. *Agroforestry Systems*, v. 73, p. 219-231, 2008.

SONGWE, N. C.; FASEHUN, F. E.; OKALI, D. U. U. Litterfall and productivity in a tropical rain forest, Southern Baakundu Forest Reserve, Cameroon. *Journal of Tropical Ecology*, v. 4, n. 1, p. 25-37, 1988.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 8, p. 51-58, 2004.

SPIRLANDELLI, F. P.; FERNANDES, É. B.; FERREIRA, J. H. D. Determinação da fragilidade ambiental por mapeamento no município de Doutor Camargo-PR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 9.; ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 15.; FÓRUM LATINO-AMERICANO DE ENGENHARIA E SUSTENTABILIDADE, 3., 2017, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Blucher, 2017.

SWIFT, M. J.; HEAL, O. W.; ANDERSON, J. M., eds. The influence of resource quality on decomposition processes. In: _____. *Decomposition in terrestrial ecosystems*. Berkeley: University of California Press, 1979. p. 118-166.

TANSLEY, A. G. The use and abuse of vegetational concepts and terms. Oxford University, 1935. In: REAL, L. A.; BROWN, J. H. (ed.). *Foundations of ecology: classic papers with commentaries*. Chicago: The University of Chicago Press, 1991.

TEEB. *A economia dos ecossistemas e da biodiversidade: integrando a economia da natureza: uma síntese da abordagem, conclusões e recomendações do TEEB*. 2010.

TOL, R. S. J. The economic impacts of climate change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2018.

TORRES, C. M. M. E. et al. *Sistemas agroflorestais no Brasil: uma abordagem sobre a estocagem de carbono*. 2014.

TURNER, R. K.; DAILY, G. C. The ecosystem services framework and natural capital conservation. *Environmental and Resources Economics*, v. 39, n. 1, p. 25-35, 2008.

UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE (UK). *Declaração dos Líderes de Glasgow sobre Florestas e Uso da Terra*. Glasgow: UK COP26, 2021. Disponível em: <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20230418175226/https://ukcop26.org/glasgow-leaders-declaration-on-forests-and-land-use/>. Acesso em: 12 abr. 2025.

VICENTE, L. C. et al. Organic carbon within soil aggregates under forestry systems and pasture in a southeast region of Brazil. *Catena*, v. 182, p. 104139, 2019.

VIEIRA FILHO, J. E. R. (org.) et al. *Diagnóstico e desafios da agricultura brasileira*. 2019.

WERNECK, M. S.; PEDRALLI, G.; GIESEKE, L. F. Produção de serapilheira em três trechos de uma floresta semidecídua com diferentes graus de perturbação na Estação Ecológica do Tripuí, Ouro Preto, MG. *Brazilian Journal of Botany*, v. 24, p. 195-198, 2001.

ZELARAYÁN, M. L. C. et al. Impacto da degradação sobre o estoque total de carbono de florestas ripárias na Amazônia Oriental, Brasil. *Acta Amazonica*, v. 45, p. 271-282, 2015.