



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

LUANA RODRIGUES VIEIRA

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES ARRANJOS AGROFLORESTAIS COM CACAU
SOBRE A SERAPILHEIRA E A FERTILIDADE DO SOLO NA AMAZÔNIA
ORIENTAL**

BELÉM
2026

LUANA RODRIGUES VIEIRA

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES ARRANJOS AGROFLORESTAIS COM CACAU
SOBRE A SERAPILHEIRA E A FERTILIDADE DO SOLO NA AMAZÔNIA
ORIENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural da Amazônia, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Dr. Francisco de Assis Oliveira.

Coorientadora: Dra. Julia Isabella de Matos Rodrigues

BELÉM
2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V657i Vieira, Luana Rodrigues
 INFLUÊNCIA DE DIFERENTES ARRANJOS AGROFLORESTAIS COM CACAU SOBRE A
 SERAPILHEIRA E A FERTILIDADE DO SOLO NA AMAZÔNIA ORIENTAL / Luana Rodrigues
 Vieira. - 2026.
 50 f. : il. color.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Ciências Florestais (PPGCF), Campus
 Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2026.
 Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Oliveira
 Coorientador: Profa. Dra. Julia Isabella de Matos Rodrigues.

1. Manejo. 2. Solos. 3. Serapilheira. I. Oliveira, Francisco de Assis , *orient.* II. Título

CDD 577.3

LUANA RODRIGUES VIEIRA

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES ARRANJOS AGROFLORESTAIS COM CACAU
SOBRE A SERAPILHEIRA E A FERTILIDADE DO SOLO NA AMAZÔNIA
ORIENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural da Amazônia, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Dr. Francisco de Assis Oliveira.

Coorientadora: Dra. Julia Isabella de Matos Rodrigues

Data da Aprovação: 28/08/2026

Banca Examinadora:

Prof. Francisco de Assis Oliveira – Orientador
Universidade Federal Rural da Amazônia

Dr.^a Julia Isabella de Matos Rodrigues – Coorientadora
Universidade Federal Rural da Amazônia

Dr.^a Thâmara Moura Lima – 1º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia

Dr.^a Vanda Maria Sales de Andrade – 2º Examinador
Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais

Dr. Manoel Tavares de Paula – 3º Examinador
Universidade Estadual do Pará

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por me permitir viver essa experiência incrível.

Aos meus pais, Eloene Rodrigues de Andrade e Josiel Araújo Vieira — *in memoriam*. (Queria que o senhor estivesse aqui, pai, para compartilhar comigo esse momento incrível da minha vida.) Espero que possa me ver aí de cima e que esteja orgulhoso de mim. Te amo e sinto saudades. Obrigada por me ensinarem a ser alguém melhor todos os dias.

À minha melhor amiga e esposa, Luciana Silva Teixeira, por sempre estar ao meu lado e ser minha maior incentivadora, obrigada por tudo, meu amor, eu amo você!

À minha amiga e minha dupla desde o primeiro semestre da graduação e agora minha coorientadora no mestrado (eu não poderia estar mais orgulhosa de você), Julia Rodrigues, por me proporcionar os melhores momentos, por me apoiar durante essa trajetória e por nunca me deixar desistir, obrigada por tudo, te amo!

À todos do grupo LABECOS que me acolheram desde o início, ainda lá na graduação e hoje no mestrado, continuam me apoiando.

A todos que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional, fazendo com que esse momento fosse possível, muito obrigada!

RESUMO

O bioma amazônico possui elevada biodiversidade e solos naturalmente pobres, cuja fertilidade depende fortemente da ciclagem de nutrientes promovida pela serapilheira. Em áreas degradadas ou convertidas para agricultura, destacam-se as florestas secundárias e os sistemas agroflorestais (SAFs) como alternativas sustentáveis para conciliar produção e conservação ambiental. Em Tomé-Açu, município no Pará marcado pelo histórico de agricultura intensiva e avanço dos SAFs, torna-se relevante compreender como esses sistemas influenciam o solo e os atributos físicos da serapilheira. Este trabalho teve como objetivo avaliar o estoque de serapilheira, a capacidade de retenção hídrica (CRH) e aspectos de fertilidade do solo em quatro SAFs com cacau (*Theobroma cacao* L.), com diferentes composições e idades, comparando-os a uma floresta secundária (FLO) utilizada como ecossistema de referência. Foram estabelecidas 5 parcelas em cada ecossistema para a coleta de serapilheira e solo. A serapilheira foi separada nas frações não lenhosa, lenhosa e miscelânea, para avaliação do estoque e da CRH. As amostras não lenhosas também foram analisadas quanto ao teor de macro e micronutrientes. Além disso, em cada parcela, coletou-se amostras de solos nas profundidades 0-10 e 10-20 para análise química. O SAF composto por cacau e mogno africano (CMA), apresentou o maior estoque total ($12,50 \pm 2,48 \text{ Mg ha}^{-1}$), enquanto CPMb (cacau, piquiá e mogno brasileiro) teve o menor ($4,18 \pm 1,33 \text{ Mg ha}^{-1}$). Para a fração não lenhosa, CMA também foi o sistema com maiores valores, equivalendo-se à FLO. Em relação à fração lenhosa, a FLO apresentou o maior valor médio ($2,95 \pm 0,56 \text{ Mg ha}^{-1}$), embora não diferindo estatisticamente de CMA e CS (cacau e seringueira). Para a capacidade de retenção hídrica, a fração não lenhosa foi similar entre os ecossistemas. Porém, na fração lenhosa, CPMb apresentou CRH significativamente maior do que CMA e CS. Na fração miscelânea, FLO só foi maior do que CS. Considerando a CRH total, FLO ($195,88 \pm 12,61\%$) e CPMb ($191,41 \pm 1,67\%$) mostraram maior eficiência, enquanto CS apresentou o menor valor ($138,82 \pm 19,00\%$). Os resultados indicam que SAFs bem manejados podem acumular estoques de serapilheira comparáveis aos de florestas secundárias, embora a capacidade de retenção hídrica e a distribuição das frações possam variar de acordo com o arranjo das espécies e o histórico de uso. Tais diferenças refletem influências do manejo, da diversidade e da estrutura dos SAFs. Esta dissertação reforça a relevância dos SAFs como estratégia para restaurar funções ecológicas e melhorar atributos do solo na Amazônia, alinhando produção agrícola, conservação e mitigação de impactos ambientais. Os indicadores analisados, estoque de serapilheira, CRH e fertilidade, contribuem para compreender o funcionamento desses sistemas.

Palavras-chave: Silvicultura, capacidade de retenção hídrica, nutrientes, manejo.

ABSTRACT

The Amazon biome harbors high biodiversity and naturally nutrient-poor soils, whose fertility depends strongly on nutrient cycling driven by litter dynamics. In degraded areas or areas converted to agriculture, secondary forests and agroforestry systems (AFSs) have emerged as sustainable alternatives for reconciling agricultural production with environmental conservation. In Tomé-Açu, Pará State, a municipality characterized by a history of intensive agricultural practices and the expansion of agroforestry systems, understanding how these systems affect soil properties and litter physical attributes is particularly relevant. This study aimed to evaluate litter stock, water-holding capacity (WHC), and soil fertility attributes in four cocoa-based agroforestry systems (AFSs) containing *Theobroma cacao* L., with different species compositions and ages, compared with a secondary forest (FLO) used as a reference ecosystem. Five plots were established in each ecosystem for litter and soil sampling. Litter was separated into non-woody, woody, and miscellaneous fractions to determine litter stock and water-holding capacity. Samples from the non-woody fraction were also analyzed for macro- and micronutrient contents. In addition, soil samples were collected from each plot at depths of 0–10 and 10–20 cm for chemical analysis. The agroforestry system composed of cocoa and African mahogany (CMa) had the highest total litter stock ($12.50 \pm 2.48 \text{ Mg ha}^{-1}$), whereas CPMb (cocoa, piquiá, and Brazilian mahogany) had the lowest stock ($4.18 \pm 1.33 \text{ Mg ha}^{-1}$). For the non-woody fraction, CMa also showed the highest litter stock, with values statistically similar to those observed in FLO. Regarding the woody fraction, FLO showed the highest mean stock ($2.95 \pm 0.56 \text{ Mg ha}^{-1}$), although it did not differ statistically from CMa and CS (cocoa and rubber tree). The water-holding capacity of the non-woody fraction did not differ among ecosystems. However, for the woody fraction, CPMb showed significantly higher WHC than CMa and CS. For the miscellaneous fraction, FLO showed higher values only than CS. Considering total WHC, FLO ($195.88 \pm 12.61\%$) and CPMb ($191.41 \pm 1.67\%$) showed the highest values, whereas CS had the lowest ($138.82 \pm 19.00\%$). These results indicate that well-managed AFSs can accumulate litter stocks comparable to those found in secondary forests, although water-holding capacity and the relative contribution of litter fractions may vary according to species composition, structural arrangement, and land-use history. Such differences reflect the combined effects of management practices, plant diversity, and the structural characteristics of agroforestry systems. This dissertation reinforces the importance of AFSs as a strategy for restoring ecological functions and improving soil attributes in the Amazon while integrating agricultural production, environmental conservation, and the mitigation of environmental impacts. The indicators evaluated—litter stock, water-holding capacity, and soil fertility—provide relevant information for understanding the functioning and ecological performance of these systems.

Keywords: Silviculture, water retention capacity, nutrients, management.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização das áreas experimentais, município de Tomé-Açu, Amazônia Oriental. O mapa principal apresenta a distribuição espacial dos cinco ecossistemas estudados, Floresta Secundária (FLO); Cacau, Coco e Mogno Brasileiro (CCMb); Cacau e Mogno Africano (CMa); Cacau e Seringueira (CS) e Cacau, Piquiá e Mogno Brasileiro (CPMb). 16
- Figura 2.** Descrição dos elementos do clima, da precipitação pluviométrica e das temperaturas médias anuais na região do Município de Tomé-Açu, Pará, no período de janeiro de 2008 a dezembro de 2024. 17
- Figura 3.** Representação esquemática dos arranjos espaciais dos sistemas agroflorestais avaliados no município de Tomé-Açu, na Amazônia Oriental. Os esquemas ilustram a composição florística e o espaçamento entre as espécies utilizadas em cada sistema. 18
- Figura 4.** Etapas de coleta de serapilheira (a) com coletor metálico vazado (b) e solos com trado holandês (c), e armazenamento das amostras em sacolas plásticas identificadas (d), realizadas em sistemas agroflorestais e floresta secundária no município de Tomé-Açu, Amazônia Oriental. 20
- Figura 5.** Processamento das amostras de serapilheira. Triagem nas frações: não-lenhoso (a), miscelânea (b), lenhoso (c), retirada do excesso de água (d e h) após a capacidade de retenção hídrica para todas as frações (e, f e g). 21
- Figura 6.** Média $\pm$ desvio padrão do estoque de serapilheira de sistemas agroflorestais e floresta secundária no município de Tomé-Açu, Amazônia Oriental. 23
- Figura 7.** Média $\pm$ desvio padrão da capacidade de retenção hídrica da serapilheira de sistemas agroflorestais e floresta secundária no município de Tomé-Açu, Amazônia Oriental. 24
- Figura 8.** Teores de macronutrientes na serapilheira dos ecossistemas. As caixas representam a mediana e o intervalo interquartil; os pontos representam as parcelas. Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Dunn–Bonferroni ($p < 0,05$). 25
- Figura 9.** Teores de micronutrientes na serapilheira dos ecossistemas avaliados. As caixas representam a mediana e o intervalo interquartil; os pontos representam as parcelas. Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Dunn–Bonferroni ($p < 0,05$). 26
- Figura 10.** Atributos químicos do solo na camada de 0–10 cm nos sistemas FLO, CPMb, CCMb, CMa e CS. Valores médios de pH, matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), magnésio (Mg), acidez trocável ($H^+ + Al$), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC a pH 7,0) e saturação por alumínio (m). Barras representam as médias e as barras verticais indicam o erro associado. Letras minúsculas diferentes sobre as barras indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de comparação de médias, ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$). 28
- Figura 11.** Atributos químicos do solo na camada de 10-20 cm nos sistemas FLO, CPMb, CCMb, CMa e CS. Valores médios de pH, matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), magnésio (Mg), acidez trocável ($H^+ + Al$), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC a pH 7,0) e saturação por alumínio (m). Barras representam as médias e as barras verticais indicam o erro associado. Letras minúsculas diferentes sobre as barras indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de comparação de médias, ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$). 29

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	6
2.OBJETIVOS	10
a)Gerais	10
b)Específicos	10
3.REFERENCIAL TEÓRICO	10
3.1. Contexto econômico do município de Tomé-Açu	10
3.2. Florestas secundárias	11
3.3. Sistemas agroflorestais: definição e importância	12
3.4. Cacaueiro como componente principal dos SAFs	12
3.5. Indicadores de estrutura e funcionalidade do ecossistema	13
a) Estoque de serapilheira	13
b) Capacidade de retenção hídrica	14
c) Fertilidade do solo	15
4.MATERIAL E MÉTODOS	15
4.1. Área de estudo	15
4.2. Ecossistemas avaliados	17
4.3. Delineamento experimental e procedimentos de campo	19
4.4. Procedimentos laboratoriais	20
4.5. Análise de dados	22
5.RESULTADOS	22
5.1. Estoque e capacidade de retenção hídrica	22
5.2. Nutrientes da serapilheira	24
5.3. Fertilidade do solo	27
6.DISSCUSSÃO	29
7.CONCLUSÃO	39
8.REFERÊNCIAS	40

1. INTRODUÇÃO

A região Amazônica é notadamente conhecida por sua rica biodiversidade de espécies fundamentais para a manutenção e o funcionamento do ecossistema, por meio da sucessão, com a provisão de bens e serviços (VILELA et al., 2019). Todavia, a grande pressão sobre os recursos naturais desse bioma, decorrente do desenvolvimento de atividades econômicas, como a agricultura e a pecuária, ocasiona o aumento do desmatamento e torna cada vez mais necessária a busca de estratégias para mitigar os impactos dessas atividades.

Com a intensificação do desmatamento e, como consequência, a degradação desses ecossistemas primários, tem-se o surgimento das florestas secundárias, que são oriundas de áreas desmatadas e que se regeneram naturalmente (HEINRICH et al., 2023). Esses ecossistemas têm ganhado cada vez mais destaque devido à sua importância, principalmente através dos processos de sucessão ecológica, que ocasionam mudanças estruturais na distribuição florestal, principalmente a partir desses distúrbios, que são capazes de ocasionar mudanças na estrutura florestal, proporcionando a sucessão ecológica (CORDEIRO et al., 2017).

Nesse contexto, a busca por formas de uso da terra capazes de conciliar a produção e a conservação dos recursos naturais tem ganhado relevância, especialmente em regiões de elevada importância ambiental, como a Amazônia (BURGESS et al., 2022; CARDINAELE et al., 2020). Os sistemas agroflorestais (SAFs) inserem-se nessa perspectiva por integrarem espécies agrícolas, arbóreas e, em alguns casos, espécies destinadas à produção madeireira, medicinal ou de produtos florestais não madeireiros, permitindo que diferentes objetivos sejam associados em uma mesma área (NAIR, 1993). Na Amazônia, essa diversidade de funções está relacionada tanto às necessidades produtivas quanto aos conhecimentos e às estratégias de manejo das populações que desenvolvem esses sistemas. Estudo recente realizado com comunidades tradicionais na Amazônia Central identificou SAFs organizados segundo diferentes finalidades, incluindo produção de alimentos, uso medicinal, produção de madeira, obtenção de produtos florestais não madeireiros e restauração do solo, evidenciando que a composição e a estrutura desses sistemas podem variar de acordo com seus objetivos de uso (GUIMARÃES et al., 2026). Assim, mais do que caracterizar os SAFs de forma geral como sistemas necessariamente sustentáveis, é importante considerar que seus efeitos ambientais e produtivos dependem da composição das espécies, do manejo adotado, das condições locais e das finalidades estabelecidas para cada área. Essa

diversidade de configurações permite que os SAFs desempenhem diferentes funções simultaneamente, como produção de alimentos e matérias-primas, geração de renda, fornecimento de produtos florestais e contribuição para a conservação dos recursos do solo, embora a magnitude desses efeitos possa variar entre os sistemas (GUIMARÃES et al., 2026).

Existem SAFs com diversos arranjos e composições de espécies; no entanto, uma espécie que é bastante comum entre os SAFs, principalmente na Amazônia, é o cacaueiro (*Theobroma cacao* L.). Por se tratar de uma das espécies mais utilizadas, devido ao seu potencial produtivo e econômico, tornou-se espécie-chave para o desenvolvimento econômico (BOLFE; BATISTELLA, 2011). Por esse motivo, alguns estudos vêm sendo realizados com o objetivo de analisar o desenvolvimento tanto produtivo quanto econômico do cacaueiro em SAFs, principalmente na Amazônia (CAICEDO-VARGAS et al., 2022; GAMA-RODRIGUES et al., 2021; SUÁREZ et al., 2021). No entanto, sua utilização inicial pode ter sido dada de maneira negativa, por se tratar de uma *commodity* agrícola de importância global, cuja produção inicialmente se expandiu à custa das florestas tropicais, intensificando o desmatamento e consequentemente a perda de biodiversidade (CLOUGH et al., 2009; KALISCHEK et al., 2023).

Os SAFs têm se mostrado uma atividade bastante eficaz na restauração de ecossistemas degradados e alterados, melhorando a qualidade física e química do solo, buscando formas alternativas para o uso do solo, além do ganho de produtividade e variedade de produção. Entretanto, antes de implementar os SAFs, é necessário apontar indicadores que sirvam para auxiliar e acompanhar o desenvolvimento desses processos, no intuito de certificar o sucesso do SAF. Dentre alguns desses indicadores, destaca-se a serapilheira, que é formada por todo material de origem vegetal e animal acumulado sobre o solo, composta por flores, frutos, folhas, troncos, galhos e restos animais (HILLMAN; GOLDING, 1981; LONGHI et al., 2011).

A esses processos estão associados os atributos físicos da serapilheira, que funcionam em sua essência, como agentes de modificação ecológica, reduzindo temperaturas elevadas no solo, reduzindo processos erosivos, lixiviação dos nutrientes, além de favorecer a atividade microbiana do solo, que é a principal responsável pela decomposição da matéria orgânica do solo (LIMA et al., 2015). Dentre alguns desses atributos, tem-se o estoque de serapilheira e a capacidade de retenção hídrica (CRH). O estoque de serapilheira contribui para a formação e incremento da matéria orgânica no

solo (SANTOS et al., 2017), enquanto a CRH baseia-se na capacidade que esse material tem de reter a umidade, favorecendo a atividade microbiana do solo (CAMARA et al., 2019; REYES et al., 2019). O aumento da atividade microbiana do solo e, conseqüentemente, maior decomposição da matéria orgânica do solo ocasionam maior qualidade nutricional e estrutural ao solo.

Outros aspectos importantes da serapilheira são as frações que a compõem, as quais geralmente são divididas em lenhosa (galhos e materiais mais enrijecidos, como casca de frutos), não-lenhosa (folhas e materiais menos enrijecidos) e miscelânea, quando não é possível classificar nas frações anteriores (FREIRE et al., 2020). No geral, cada uma dessas frações contribui de maneira diferente para a dinâmica de nutrientes solo-planta, variando de acordo com a qualidade nutricional e o tipo de material. A decomposição das frações está relacionada à sua composição química e ao teor de lignina na fração não-lenhosa; por exemplo, isso está relacionado ao teor de C, N e P, que geralmente se decompõe mais rapidamente devido à sua maior área superficial e torna-se fonte crucial de rápida liberação de nutrientes essenciais (MORFFI-MESTRE et al., 2023). A fração lenhosa caracteriza-se por uma decomposição mais lenta e gradual, devido à sua estrutura mais rígida e ao maior teor de lignina, celulose e hemicelulose, o que afeta as taxas de decomposição, contribuindo principalmente para a formação de matéria orgânica estável no solo a longo prazo (MORFFI-MESTRE et al., 2023). Por fim, a miscelânea também contribui para a complexidade do sistema, com taxas de decomposição que variam de maneira específica, dependendo dos materiais que a compõem. Portanto, o estudo e a análise dessas frações específicas são cruciais para modelar com precisão a dinâmica de nutrientes dentro dos ecossistemas.

A avaliação dos atributos do solo constitui uma importante ferramenta para compreender a qualidade física, química e biológica do solo, associada aos sistemas agroflorestais, uma vez que a integração de espécies arbóreas e agrícolas pode modificar a dinâmica da matéria orgânica, da água e dos nutrientes no solo. Nesse contexto, atributos como pH, matéria orgânica, carbono orgânico, capacidade de troca catiônica, disponibilidade de nutrientes, densidade e umidade do solo podem atuar como indicadores de sua qualidade e funcionamento, permitindo identificar alterações decorrentes da composição e do manejo dos diferentes arranjos agroflorestais. Essas características estão diretamente relacionadas à capacidade do solo de armazenar água e nutrientes e de sustentar processos de ciclagem de elementos, sendo, portanto, fundamentais para compreender a contribuição dos sistemas agroflorestais para a

conservação e a sustentabilidade dos ecossistemas (NGABA et al., 2024; SOUZA et al., 2025).

A efetividade da avaliação dos benefícios dos SAFs pode ser validada quando se comparam esses sistemas a outras formas de uso da terra, tais como as florestas secundárias. Estudos realizados no Brasil demonstram que a composição da serapilheira e suas relações com o solo variam entre sistemas agroflorestais e florestas secundárias, refletindo diferenças na composição vegetal, no aporte de resíduos e nas condições ambientais (FROUFE et al., 2020).

Apesar da importância dos macronutrientes para a ciclagem de nutrientes, elementos requeridos em menores concentrações, como boro (B), molibdênio (Mo), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn), também desempenham funções essenciais no metabolismo vegetal, atuando como componentes ou ativadores de enzimas e participando de processos como fotossíntese, metabolismo do nitrogênio, equilíbrio redox e manutenção da estrutura celular. Dessa forma, mesmo presentes em menores quantidades, esses elementos são fundamentais para o crescimento, desenvolvimento e funcionamento fisiológico das plantas (HÄNSCH; MENDEL, 2009).

Entretanto, a dinâmica dos micronutrientes na serapilheira ainda é menos conhecida quando comparada à de elementos como nitrogênio e fósforo, uma vez que grande parte dos estudos sobre decomposição e ciclagem de nutrientes historicamente concentrou-se na perda de massa, no carbono e nos macronutrientes. Embora elementos como ferro, manganês, zinco e cobre ocorram em menores concentrações, sua presença na serapilheira participa dos processos de decomposição e da ciclagem biogeoquímica entre a vegetação e o solo, sendo influenciada por fatores relacionados às características das plantas, ao ambiente e às propriedades do solo. Dessa forma, a avaliação desses elementos na serapilheira contribui para ampliar a compreensão da dinâmica de nutrientes nos ecossistemas e dos processos envolvidos na transferência de elementos entre a biomassa vegetal e o solo (PENG et al., 2023). Estudos mais recentes demonstram, entretanto, que a importância do Mo pode variar de acordo com as condições ambientais e a disponibilidade de N e P, não sendo possível assumir que sua concentração esteja necessariamente associada à limitação da fixação de N (WONG et al., 2021).

Diante disso, a questão científica que norteou este trabalho foi: Como diferentes arranjos de sistemas agroflorestais com cacau influenciam o estoque, a capacidade de

retenção hídrica e a composição nutricional da serapilheira, bem como os atributos de fertilidade do solo, em comparação com uma floresta secundária? Para responder à questão, tem-se a seguinte hipótese: Diferentes arranjos de sistemas agroflorestais com cacau promovem respostas distintas nos atributos da serapilheira e na fertilidade do solo, de modo que a composição e a estrutura dos sistemas podem resultar em diferentes padrões de estoque, retenção hídrica e disponibilidade de nutrientes, com alguns atributos apresentando valores semelhantes aos observados na floresta secundária e outros divergindo entre os sistemas.

2. OBJETIVOS

a) Geral

- Avaliar como diferentes arranjos de sistemas agroflorestais com cacau influenciam o estoque, a capacidade de retenção hídrica e a composição nutricional da serapilheira, bem como os atributos de fertilidade do solo, utilizando uma floresta secundária como ecossistema de referência na Amazônia Oriental.

b) Específicos

- Estimar o estoque de serapilheira de sistemas agroflorestais com diferentes arranjos, composição e idade, em comparação com uma floresta secundária;
- Avaliar e comparar a capacidade de retenção hídrica da serapilheira total e de suas diferentes frações entre os ecossistemas avaliados;
- Quantificar os atributos químicos do solo e da serapilheira;
- Comparar os padrões de resposta dos atributos da serapilheira e do solo entre os diferentes arranjos agroflorestais, considerando a floresta secundária como referência.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Contexto econômico do município de Tomé-Açu

A degradação de florestas, especialmente na Amazônia, é causada, principalmente, por atividades como a pecuária e a agricultura, sejam elas em pequena ou larga escala. Na Amazônia, a ocupação territorial baseou-se, principalmente, na prática de derruba e queima para a produção de alimentos, sendo que, apesar da geração de alimentos para os agricultores familiares, a prática intervém negativamente no funcionamento do ecossistema (PEDROSO et al., 2008; REGO; KATO, 2017). O município de Tomé-Açu destaca-se nesse contexto, justamente por fazer parte dessa

realidade, sendo um município reconhecido historicamente na atuação das práticas de agricultura e, com o passar do tempo, entrou para o polo dos principais produtores de agroflorestas da Amazônia (HOMMA, 2006).

A expansão agrícola de Tomé-Açu foi incrementada sobretudo com a produção da pimenta-do-reino (*Piper nigrum* L.), tornando o município o maior produtor de pimenta do mundo (OLIVEIRA et al., 2022). A partir da década 1970, o município enfrentou uma crise econômica causada pela diminuição drástica da produção em função da disseminação da fusariose, doença causada pelo fungo *Fusarium*, que devastou os plantios de pimenta do reino (HOMMA, 2006).

Ao longo do tempo, a busca por superar os desafios da produção, o avanço de tecnologias e a crescente demanda por atividades que causassem menos impactos ambientais resultaram no aperfeiçoamento de técnicas agrícolas e florestais, que expandiram economicamente a região (GONZÁLEZ; KROGER, 2020). Atualmente, a implantação e o manejo de sistemas agroflorestais (SAFs) representam a principal atividade econômica de Tomé-Açu, consolidando o município como um dos maiores produtores agroflorestais da Amazônia e do Brasil (BARROS et al., 2009; HOMMA, 2006), o que auxilia na recuperação das florestas secundárias degradadas.

3.2. Florestas secundárias

As florestas secundárias tornaram-se alvo de degradação excessiva, destacando a importância do uso de sistemas alternativos para a produção agroflorestal. Floresta secundária é aquela resultante dos processos naturais de sucessão, após um distúrbio parcial ou total da vegetação primária, seja por causas naturais ou ações antrópicas, podendo ainda ter ocorrência de remanescentes da vegetação primária (CONAMA, 1994).

A vegetação secundária pode ser caracterizada quanto ao estágio de sucessão, dividida em inicial, médio e avançado. O estágio inicial é dominado por uma fisionomia herbácea/arbustiva de porte baixo, com altura de até 4 metros e cobertura vegetal variando de fechada a aberta, onde a serapilheira, quando existente, forma uma camada fina e pouco decomposta (BRESSANE et al., 2018). Já no estágio médio, há um predomínio da fisionomia arbórea e arbustiva sobre a herbácea, com a presença de estratos diferentes. Nesse estágio, a altura total média é de até 12 metros e a espessura da serapilheira presente varia de acordo com a sazonalidade. E por fim, no estágio avançado de regeneração, existe domínio da fisionomia arbórea sobre as demais,

formando um dossel fechado e relativamente uniforme, podendo apresentar árvores emergentes, altura total média de até 20 metros, com serapilheira abundante (BRESSANE et al., 2018).

No entanto, o avanço de atividades agrícolas e florestais tem resultado na perda de florestas em diferentes estágios sucessionais, dificultando o avanço da sucessão, evidenciando a importância de sistemas alternativos de produção, como os sistemas agroflorestais (SAFs), para desenvolver uma produção mais sustentável e lucrativa, diminuindo de maneira significativa a pressão sobre os ecossistemas de florestas naturais.

3.3. Sistemas agroflorestais: definição e importância

De maneira geral, os SAFs caracterizam-se como uma alternativa de uso da terra que proporciona formas diversificadas de geração de renda, produção e segurança alimentar (GARCIA et al., 2021; LÔBO et al., 2021). Nesse modelo de produção, tem-se as espécies arbóreas e/ou arbustivas que são cultivadas de maneira consorciada com espécies agrícolas em arranjos espaciais e temporais, havendo também a possibilidade de criação de animais (MARTINS; RANIERI, 2014; VIEIRA; SILVA, 2008). Por isso, podem ser classificados segundo seus aspectos ecológicos, econômicos e funcionais e ainda de acordo com o arranjo dos componentes e a sua estrutura (SENAR, 2017).

Por desempenharem um papel importante na recuperação de áreas degradadas e/ou alteradas, os SAFs caracterizam-se como uma estratégia eficaz no combate às mudanças climáticas e, por isso, fazem parte das ações estratégicas de mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), as quais compõem a Política Nacional sobre Mudanças do Clima (PNMC) (TORRES et al., 2014). Outros benefícios estão associados à melhoria da qualidade dos solos e à diminuição de erosões (QUEIROZ et al., 2020; LÔBO et al., 2021). Além disso, outra característica, é o incremento de matéria orgânica no solo, quando comparada aos monocultivos, o que pode estar ligado ao fato dos SAFs, promoverem um ambiente propício com maior produção e acúmulo de serapilheira, aumentando a disponibilização de nutrientes para o sistema solo-planta (RIBASKI et al., 2001) e por conta da diversidade de espécies, favorece o aumento e a riqueza, bem como a dinâmica microbiana presente no solo (BASTOS et al., 2023; RIVEST et al., 2013).

3.4. Cacaueiro como componente principal dos SAFs

Dentre a variedade de espécies que podem compor um SAF, existem algumas “espécies-chave”, como é o caso do cacaueiro (*Theobroma cacao* L.), comumente utilizado como componente principal dos SAFs, especialmente na região amazônica. O cacaueiro é uma espécie arbórea nativa da floresta amazônica, pertencente à família malvaceae (GALVÃO et al., 2024). Por ser uma espécie tolerante à sombra, quando consorciada com espécies florestais sombreadoras, apresenta sua produção potencializada, se manejada de forma correta (ARMENGOT et al., 2020). SAFs contendo o cacaueiro como espécie frutífera principal têm-se mostrado bastante promissores, visto que agregam valor às propriedades que fazem uso dessa espécie nesses sistemas, além de ajudar a conservar ecossistemas naturais e espécies florestais nativas (MUNJEB et al., 2021), proporcionando ainda o aumento no estoque e nos teores de C orgânico do solo (MONROE et al., 2016).

Alguns estudos têm sido desenvolvidos para avaliar o potencial do cacaueiro dentro desses ecossistemas a respeito dos impactos ambientais associados à eficiência econômica de SAFs com cacaueiro (CAICEDO-VARGAS et al., 2022), em diferentes teores de fósforo orgânico do solo (ALEIXO et al., 2019), destacando a importância de pesquisas na área, que alinhem produção rural e políticas públicas que visem uma produção cada vez mais alinhada com as práticas de produção e desenvolvimento sustentável. Em 2024, no Brasil foram produzidas mais de 290 mil toneladas de cacau, com um valor de mais de 15 milhões de reais, sendo o Pará o principal produtor (IBGE, 2025).

3.5. Indicadores de estrutura e funcionalidade do ecossistema

a) Estoque de serapilheira

A serapilheira contribui para a formação e manutenção da fertilidade dos solos através do processo de decomposição e ciclagem de nutrientes, especialmente nas florestas amazônicas, que são consideradas pouco férteis naturalmente, além de ser a principal fonte natural de nutrientes (FLORES et al., 2020; GODINHO et al. 2014; QUESADA et al., 2011). Em florestas naturais da Amazônia, a eficiência da ciclagem de nutrientes, se dá principalmente pela manutenção da produtividade, onde a produção e decomposição da serapilheira, que são processos fundamentais para o funcionamento do ecossistema (CALDEIRA et al., 2013).

A serapilheira presente na rizosfera de florestas secundárias da Amazônia, principalmente por se tratar de solos com baixa fertilidade, desempenha papel

fundamental nos processos de transferência de nitrogênio e carbono orgânico para o solo, desempenhando assim funções essenciais para o funcionamento desses ecossistemas (MAIA et al., 2015). A interação solo-planta e a movimentação desses nutrientes permitem que haja um equilíbrio ecológico, possibilitando um melhor desenvolvimento desses ecossistemas, onde a principal fonte de nutrientes é a biomassa estocada, além de ser o principal fator que favorece esse desenvolvimento (HOLANDA et al. 2017).

A decomposição da serapilheira pode ser regulada por diversos fatores, no entanto depende essencialmente da interação de três grupos de variáveis, sendo eles: as condições físicas e químicas do ambiente, que são controladas pelas características edafoclimáticas; a qualidade do material depositado, de espécie, estágio sucessional, idade, época da coleta, tipo de sistema e local, que determina seu grau de degradação e a natureza dos macro e microrganismos presentes no meio (CALDEIRA et al., 2013; CORREIA e ANDRADE, 1999; HEAL et al., 1997). De maneira geral, o clima por sua vez, controla o processo de decomposição em escala regional, enquanto a composição química do material domina o processo em escala local (BERG, 2000).

Tendo em vista que, a serapilheira desempenha papel importante dentro desse contexto, sendo a principal responsável pelo provimento de nutrientes, através de processos como a decomposição e mineralização, fornecendo energia e nutrientes para a formação e manutenção da fertilidade desses solos, a análise de estoque da mesma, faz-se necessária, pois é através dessa análise que se pode inferir a quantidade de nutrientes que será fornecido dentro dessa dinâmica solo-planta (SILVA et al., 2018).

b) Capacidade de retenção hídrica

Quando se fala em ecossistemas florestais, os atributos físicos da serapilheira, como a densidade, armazenamento e CRH, atuam como fatores no potencial de modificação ecológica, favorecendo a germinação de espécies intolerantes a luz, reduzindo as altas temperaturas no solo, além de diminuir os riscos de erosão e favorecer o desenvolvimento da biota e microbiota do solo.

A CRH trata-se da capacidade que esse material tem de reter água, e essa capacidade está relacionada aos fenômenos de adsorção e absorção. A adsorção depende de alguns fatores como a área foliar, estrutura, relevo, forma, relação superfície/peso seco e composição orgânica do material, enquanto a absorção depende da porosidade do

material depositado, velocidade de decomposição, variação da precipitação e da temperatura do ambiente, entre outros fatores (VOIGT; WALSH 1976).

Dessa maneira, a capacidade desse material de reter água está intimamente associada às suas frações e sobretudo ao seu estágio de decomposição (XIA et al., 2019). Ou seja, quanto mais eficiente for a decomposição, menores serão as partículas de serapilheira e estas, conseqüentemente, apresentarão maior superfície de contato e absorção das moléculas de água (MELOS et al., 2010; XIA et al., 2019).

c) Fertilidade do solo

A qualidade do solo é um atributo importante quando se fala em “saúde” do solo, por isso, estudos edafológicos são necessários para verificar a influência de determinados ecossistemas na qualidade do solo. De maneira geral, a implementação de SAFs, por exemplo, resulta no aumento da fertilidade e da atividade biológica do solo. Isso ocorre principalmente por meio da produção e deposição de biomassa, o que eleva os níveis de matéria orgânica, promovendo uma ciclagem de nutrientes de forma eficiente e equilibrada, através da mineralização da matéria orgânica (DOLÁCIO et al., 2021).

Entre os atributos do solo mais utilizados como indicadores de qualidade em SAFs, estão aqueles relacionados à fertilidade do solo, onde os associados à química do solo são os mais comumente utilizados, destacando-se o pH, C orgânico e matéria orgânica, bases trocáveis, acidez ativa e potencial, capacidade de troca catiônica (CTC), dentre outros atributos (ALFAIA et al., 2004; GUILLOT et al., 2021). Além destes, alguns atributos físicos do solo também têm sido utilizados como indicadores, com o intuito de avaliar os efeitos dos SAFs na estrutura e qualidade físico-hídrica do solo (BÉLIVEAU et al., 2017; POLANÍA-HINCAPIÉ et al., 2021). E dentro desse contexto, apesar de ainda pouco explorados, os atributos biológicos também são indicadores interessantes de qualidade e funcionalidade dos solos, dada sua elevada sensibilidade às alterações microclimáticas e às práticas de manejo (ASFAW; ZEWUDIE, 2021; DENG et al., 2022). Portanto, é importante destacar a importância dessas avaliações, principalmente em SAFs com diferentes arranjos e composições, para melhor estabelecer essas relações.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na Fazenda Matsunaga, localizada no Município de Tomé-Açu, Pará, Brasil (Figura 1). O município está distante 200 km da capital do estado e compreende uma área de aproximadamente 5.145,361 km² e 67.585 habitantes (IBGE, 2025). A região tem clima mesotérmico e úmido, do tipo Ami, de acordo com a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 26 °C e umidade relativa do ar que varia em torno de 85%. A média anual de precipitação é de 2.300 mm (INMET, 2025). As classificações de solos encontrados na região são latossolos amarelos; latossolos vermelho-amarelos; argissolos amarelos; gleissolos e neossolos (RODRIGUES et al., 2001). A vegetação natural da região é do tipo Floresta Ombrófila Densa (IBGE, 2025).

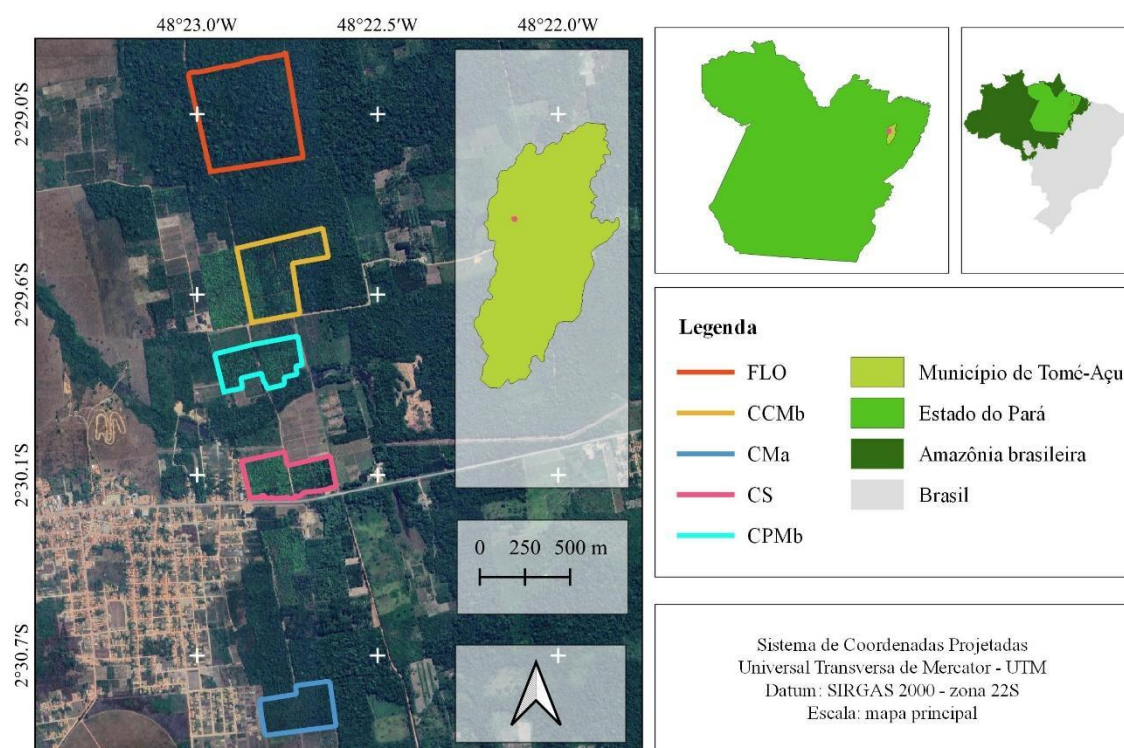


Figura 1. Localização das áreas experimentais, município de Tomé-Açu, Amazônia Oriental. O mapa principal apresenta a distribuição espacial dos cinco ecossistemas estudados, Floresta Secundária (FLO); Cacau, Coco e Mogno Brasileiro (CCMb); Cacau e Mogno Africano (CMA); Cacau e Seringueira (CS) e Cacau, Piquiá e Mogno Brasileiro (CPMb).

Considerando uma série histórica de 2008 a 2024 (INMET, 2025), a temperatura média anual é de 26 °C e a precipitação, de 2.300 mm. Os meses com maior e menor temperatura são, respectivamente, novembro e agosto, com 25 °C e 21 °C. Em relação à precipitação, os meses de maior e menor ocorrência são março e agosto, respectivamente (Figura 2).

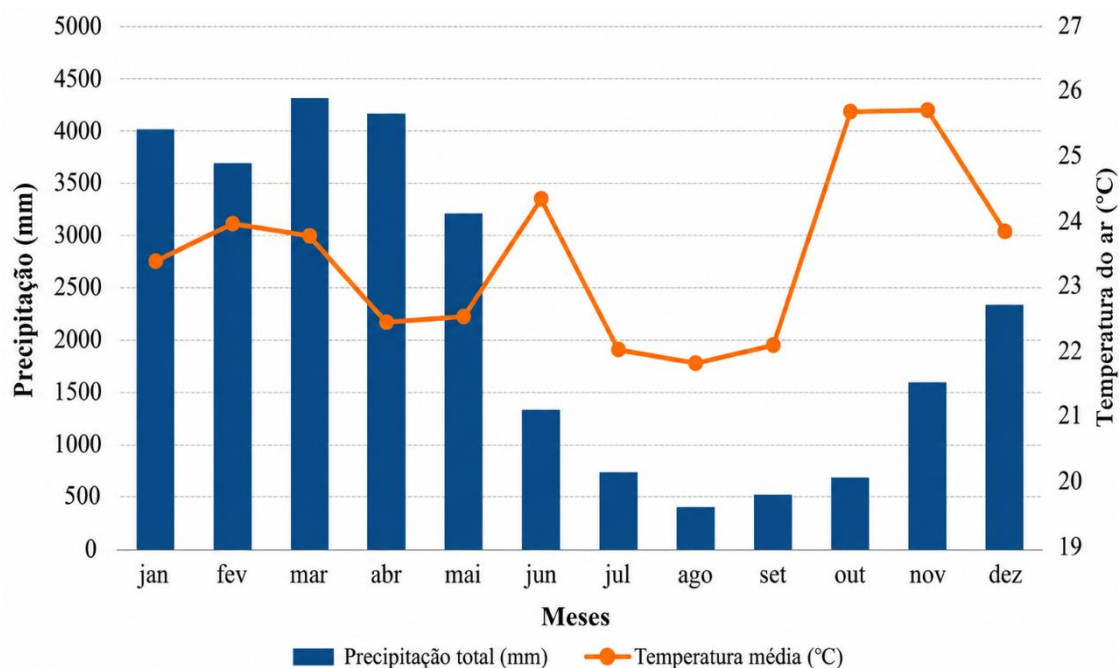


Figura 2. Descrição dos elementos do clima, da precipitação pluviométrica e das temperaturas médias anuais na região do Município de Tomé-Açu, Pará, no período de janeiro de 2008 a dezembro de 2024.

4.2. Ecossistemas avaliados

Nesse estudo, foram avaliados cinco ecossistemas: quatro sistemas agroflorestais (SAFs) com cacauero como espécie principal e uma floresta secundária (FLO), utilizada como ecossistema de referência. Os SAFs avaliados foram: Cacau, Coco e Mogno Brasileiro (CCMb); Cacau e Mogno Africano (CMa), Cacau e Seringueira (CS); e Cacau, Piquiá e Mogno Brasileiro (CPMb). Os sistemas apresentavam diferenças na quantidade de espécies e nos espaçamentos de plantio (Figura 3), além do tamanho da área, da idade e do uso inicial da área (Tabela 1). Em todos os SAFs, as mudas foram produzidas via seminal, sendo que as de cacauero foram produzidas a partir de sementes híbridas resultantes do cruzamento das variedades Amazônico e Trinitário (material proveniente da CEPLAC). As sementes de coco (*Cocos nucifera* L.) foram provenientes da Cooperativa de Tomé-Açu (CAMTA), enquanto as de mogno brasileiro (*Swietenia macrophylla* King) foram oriundas de matrizes da região de Xinguara – PA, e as de mogno africano (*Khaya grandifoliola* C. DC.) foram doadas pela Embrapa Amazônia Oriental. No caso das sementes de seringueira (*Hevea brasiliensis* L.) e piquiá (*Caryocar villosum* Aubl. Pers.), as matrizes estavam localizadas na própria região e na fazenda, respectivamente.

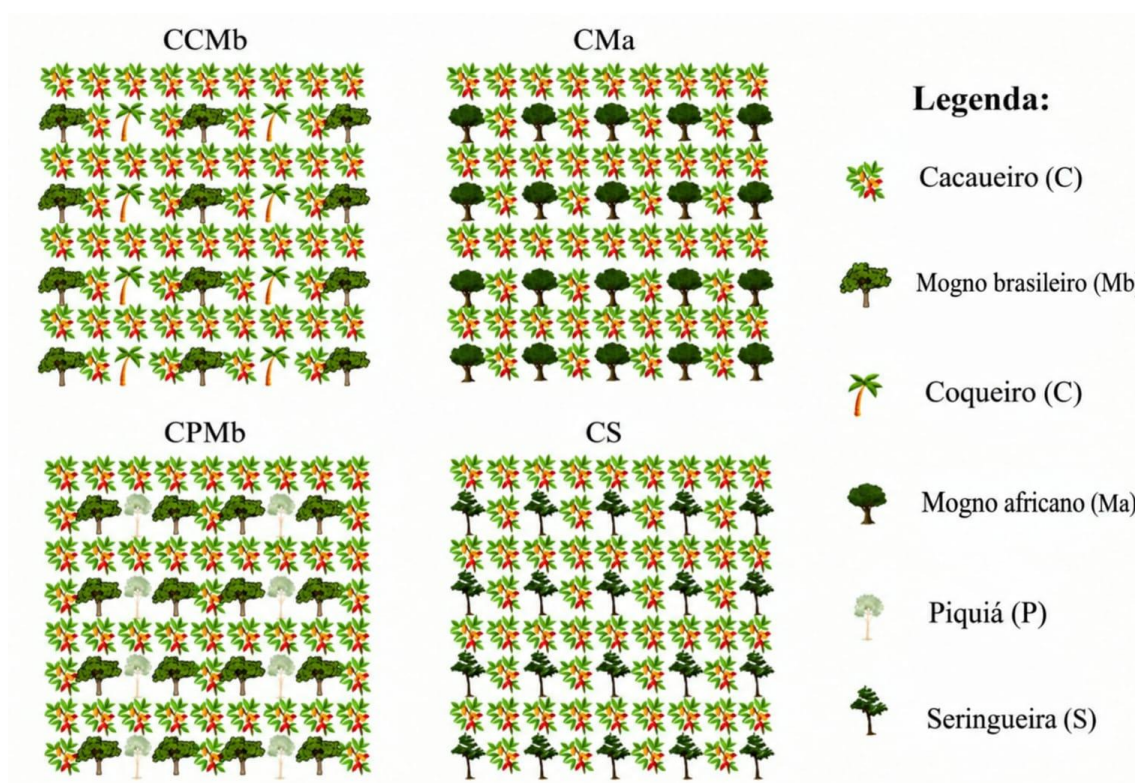


Figura 3. Representação esquemática dos arranjos espaciais dos sistemas agroflorestais avaliados no município de Tomé-Açu, na Amazônia Oriental. Os esquemas ilustram a composição florística e o espaçamento entre as espécies utilizadas em cada sistema.

Nota: CCMb = Cacau, Coco e Mogno brasileiro; CMa = Cacau e Mogno africano; CPMb = Cacau, Piquiá e Mogno brasileiro; CS = Cacau e seringueira.

Tabela 1. Descrição dos sistemas agroflorestais e floresta secundária avaliados no município de Tomé-Açu, Amazônia, com as respectivas espécies, idade, área e uso inicial dos ecossistemas.

Ecossistema	Sigla	Espécies	Idade (anos)	Área (ha)	Cultivo inicial
Sistema Agroflorestal	CCMb	<i>Theobroma cacao</i> L. (cacau)	23	14	Pimenta-do-reino (<i>Piper nigrum</i> L.)
		<i>Cocos nucifera</i> L. (coco)			
		<i>Swietenia macrophylla</i> King (mogno brasileiro)			
	CMa	<i>Theobroma cacao</i> L. (cacau) <i>Khaya grandifoliola</i> C. DC. (mogno	22	8	Braquiária (<i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu)

africano)					
CS		<i>Theobroma cacao</i> L. (cacau)	24	8	Pimenta-do-reino (<i>Piper nigrum</i> L.)
		<i>Hevea brasiliensis</i> L. (seringueira)			
CPMb		<i>Theobroma cacao</i> L. (cacau)	19	9	Floresta secundária
		<i>Caryocar villosum</i> Aubl. Pers. (piquiá)			
		<i>Swietenia macrophylla</i> King (mogno brasileiro)			
Floresta secundária	FLO	Floresta secundária oriunda de regeneração natural	36	25	-

Em todos os SAFs, foi realizada a poda de formação, visando evitar o crescimento exacerbado da copa e a incidência de ramos infectados por *Crinipellis pernicioso*, causador da doença conhecida popularmente como vassoura de bruxa. Além disso, nos SAFs periodicamente realizava-se a roçagem com roçadeira acoplada a trator 4 x 2, nas entrelinhas e roçagem semimecanizada nas linhas, com roçadeira manual. Para todos os SAFs, a adubação pré-implantação foi de 1 t ha⁻¹ de CaMg(CO₃)² à lanço, vinte dias antes do plantio. Somado a isso, durante o plantio foram aplicados 1 t ha⁻¹ de NPK 10-28-20 (a lanço) e 1 t ha⁻¹ de fertilizante fosfatado Yoorin Mg (18% de P₂O₅) na cova. Para CCMb e CS, houve ainda a aplicação de 90 g planta⁻¹ de KCl na cova de plantio.

4.3. Delineamento experimental e procedimentos de campo

Foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado (DIC), no qual as coletas de serapilheira e solo foram realizadas de maneira aleatória no interior de cinco parcelas de 30 m x 30 m implantadas em cada ecossistema. Tanto para as amostras de serapilheira quanto para as amostras de solo, realizou-se uma única coleta, no início do mês de julho de 2025, transicionando entre o final de junho e o início do mês de julho, visto que marca a transição do período mais chuvoso para o período mais seco do

município (INMET, 2025). A escolha deste período foi realizada com o intuito de reduzir o viés ao selecionar um período de maior ou menor precipitação. Sendo assim, em cada parcela foram realizadas cinco coletas, totalizando 25 sub-unidades de amostra por ecossistema. As amostras foram coletadas com o auxílio de um coletor (Figura 4a), retirando toda a serapilheira contida (Figura 4b); depois, foram armazenadas em sacos plásticos devidamente identificados (Figura 4d).

A amostragem de solo foi realizada no mesmo local, após a retirada da serapilheira, utilizando o trado holandês para a coleta do material (Figura 4c), com cinco amostras simples deformadas nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm, as quais foram homogeneizadas e resultaram em uma amostra composta por profundidade em cada parcela. Após as coletas, as amostras de serapilheira e solo foram levadas ao Laboratório de Manejo de Ecossistemas e Bacias Hidrográficas (LABECOS), localizado na Universidade Federal Rural da Amazônia, no município de Belém.



Figura 4. Etapas de coleta de serapilheira (a) com coletor metálico vazado (b) e solos com trado holandês (c), e armazenamento das amostras em sacolas plásticas identificadas (d), realizadas em sistemas agroflorestais e floresta secundária no município de Tomé-Açu, Amazônia Oriental.

4.4. Procedimentos laboratoriais

Em laboratório, as amostras de serapilheira foram triadas em três frações: não lenhosa (folhas e material menos enrijecido - Figura 5a), lenhosa (galhos e material mais enrijecidos - Figura 5c), e miscelânea (raízes, sementes, frutos e material não identificado - Figura 5b). Após a triagem, foi realizado o procedimento para a avaliação da capacidade de retenção hídrica da serapilheira, no qual as amostras foram distribuídas em bandejas e submersas em água por cerca de 90 min (Figura 5e, 5f e 5g). Em seguida, foram inclinadas a 45° por 40 minutos, para a retirada do excesso de água (Figuras 5d e 5h). Após esse tempo, as amostras foram pesadas em balança de precisão de 0,01 g para obtenção da massa úmida. Para obtenção de massa seca, as amostras foram levadas à estufa a 65 °C por 48 h e, posteriormente, utilizando a balança, foi obtida a massa seca. O estoque e a capacidade de retenção hídrica da serapilheira foram obtidos por meio das equações 1 e 2, respectivamente.



Figura 5. Processamento das amostras de serapilheira. Triagem nas frações: não-lenhoso (a), miscelânea (b), lenhoso (c), retirada do excesso de água (d e h) após a capacidade de retenção hídrica para todas as frações (e, f e g).

$$Est = \frac{Ms}{1000000} / A \quad Eq. 1$$

Onde: Est = Estoque de Serapilheira (Mg ha⁻¹); Ms = massa seca (g); A = Área do coletor (ha).

$$CRH (\%) = \frac{Mu - Ms}{Ms} * 100 \quad Eq. 2$$

Onde: CRH = Capacidade de Retenção Hídrica (%); Mu = Massa úmida (g); Ms = Massa seca (g).

Após a pesagem, a fração não lenhosa foi triturada em um moinho de lâminas do tipo Willey com peneira de 20 *mesh*, a fim de analisar os teores de macronutrientes, visto que esta fração corresponde a mais de 60% da serapilheira (Zhang et al., 2014). O teor de N foi determinado pelo método de Kjeldahl e o P, por meio de espectrômetro UV-VIS. Para K⁺, utilizou-se a espectrometria de chama de emissão, enquanto Ca⁺² e Mg⁺² foram determinados por espectrometria de absorção atômica. Para as amostras de solo, após secagem ao ar livre e secagem em estufa a 55 °C por 48 horas, realizou-se a caracterização química (N, matéria orgânica, pH_{H2O}, P, K⁺, Ca⁺², Mg⁺² e Al⁺³). Com os parâmetros obtidos, calcularam-se a soma de bases (SB); a capacidade de troca de cátions a pH (CTCpH7); a saturação por bases (V) e a saturação por alumínio (m).

4.5. Análise de dados

Para o teste de hipótese, utilizou-se um nível de 5% de probabilidade de erro, em que inicialmente todas as variáveis foram submetidas a testes de normalidade e de homocedasticidade de variância, por meio dos testes de Shapiro-Wilk e de Bartlett de homocedasticidade de variância, respectivamente. Após pressupostos atendidos, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) para avaliar a existência de diferenças entre os ecossistemas (FLO, CCMb, CMa, CS e CPMb) para cada fração ($p < 0,05$). Em caso de ANOVA significativa, as médias foram comparadas por meio do teste de Tukey ($p < 0,05$). As diferenças nas características químicas nas profundidades 0-10 e 10-20 do solo nos diferentes sistemas agroflorestais e na floresta de referência foram avaliadas a partir do teste de Kruskal-Wallis. O teste *post-hoc* de Dunn com correção de Bonferroni foi utilizado para as variáveis que apresentaram diferença significativa. As análises estatísticas e gráficos foram elaborados por meio do software R v. 4.4.3 (R Core Team, 2025).

5. RESULTADOS

5.1. Estoque e capacidade de retenção hídrica da serapilheira

Para a fração não lenhosa da serapilheira, o CMa ($6,98 \pm 1,69 \text{ Mg ha}^{-1}$) apresentou o maior estoque ($F_{[4,20]} = 16,72$; $p < 0,01$) entre os SAFs, porém não diferiu da FLO ($5,05 \pm 0,93 \text{ Mg ha}^{-1}$; Figura 6). A FLO ($2,95 \pm 0,56 \text{ Mg ha}^{-1}$) foi

estatisticamente semelhante ($F_{[4,20]} = 7,62$; $p = 0,869$) apenas a CMa ($1,80 \pm 1,09 \text{ Mg ha}^{-1}$). Na fração miscelânea, CMa ($3,72 \pm 1,28 \text{ Mg ha}^{-1}$) apresentou maiores médias do que CPMb ($1,07 \pm 1,08 \text{ Mg ha}^{-1}$) e FLO ($0,934 \pm 0,13 \text{ Mg ha}^{-1}$), porém não diferiu dos demais ecossistemas ($F_{[4,20]} = 4,29$; $p > 0,05$). No acúmulo de serapilheira total, CMa apresentou o maior estoque ($12,50 \pm 2,48 \text{ Mg ha}^{-1}$) e CPMb, o menor ($4,18 \pm 1,33 \text{ Mg ha}^{-1}$), embora este último não tenha diferido de CS ($F_{[4,20]} = 13,77$; $p = 0,09$; Figura 6).

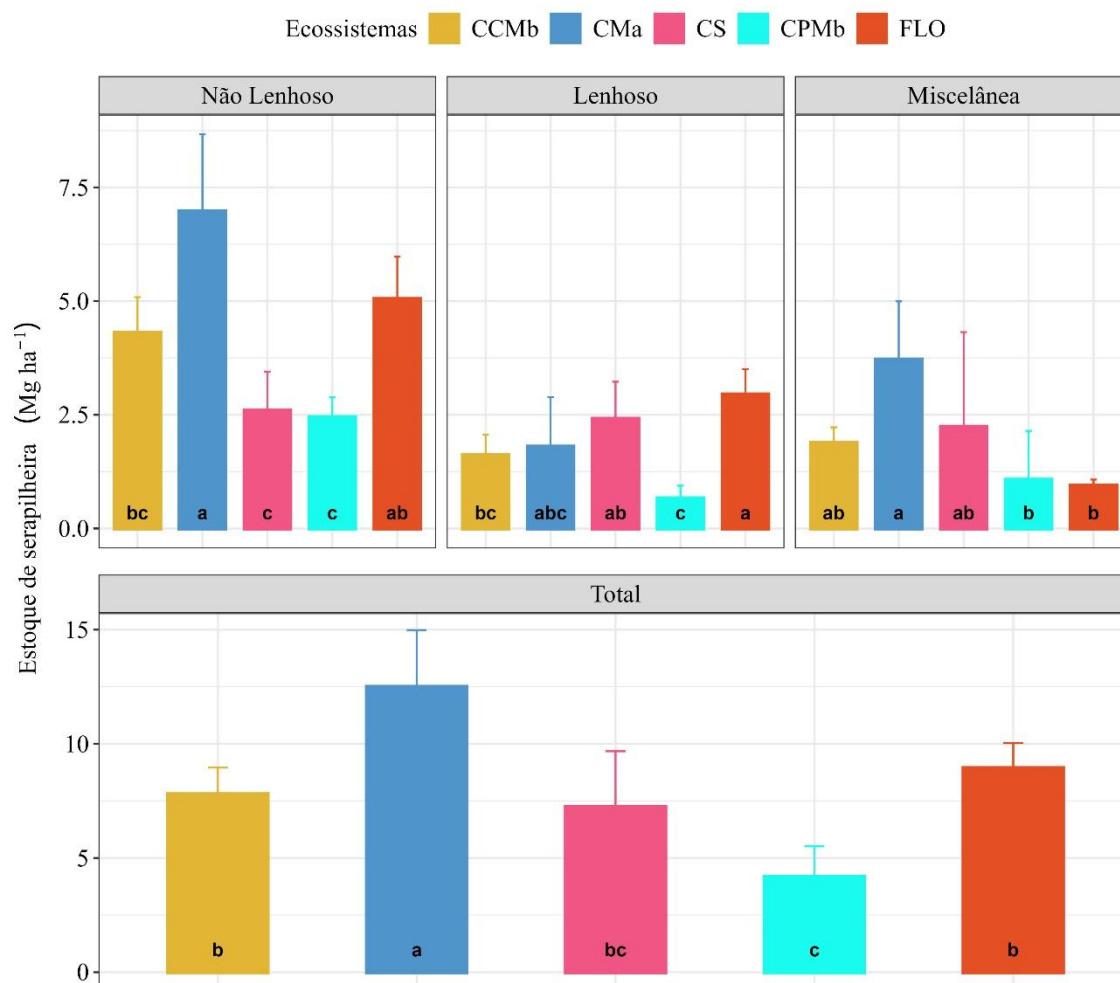


Figura 6. Média $\pm$ desvio padrão do estoque de serapilheira de sistemas agroflorestais e floresta secundária no município de Tomé-Açu, Amazônia Oriental.

No caso da CRH da serapilheira, não foram detectadas diferenças significativas entre os ecossistemas para a fração não lenhosa (Figura 7). A fração lenhosa de CPMb ($155,48 \pm 29,30 \%$) foi maior do que de CMa ($92,63 \pm 22,40\%$) e CS ($86,67 \pm 15,00 \%$), porém não diferiu de CCMb e FLO (Figura 7). Na fração miscelânea, a FLO apresentou os maiores valores ($207,95 \pm 23,21 \%$), porém foi estatisticamente semelhante a CPMb ($167,56 \pm 21,22 \%$), CMa ($166,83 \pm 39,20\%$) e CCMb ($161,93 \pm 41,12 \%$), enquanto

CS apresentou o menor valor ($96,19 \pm 42,90$ %; $F_{[4;20]} = 6,697$; $p = 0,00137$). Para a capacidade de retenção hídrica média total, FLO ($195,88 \pm 12,61$ %) e CPMb ($191,41 \pm 1,67$ %) apresentaram os maiores valores médios ($F_{[4;20]} = 6,697$; $p = 0,00137$), enquanto CS apresentou o menor ($138,82 \pm 19,00$ %), embora não tenha diferido de CMa ($159,91 \pm 16,30$ %) e CCMb ($175,02 \pm 36,00$ %; Figura 7).

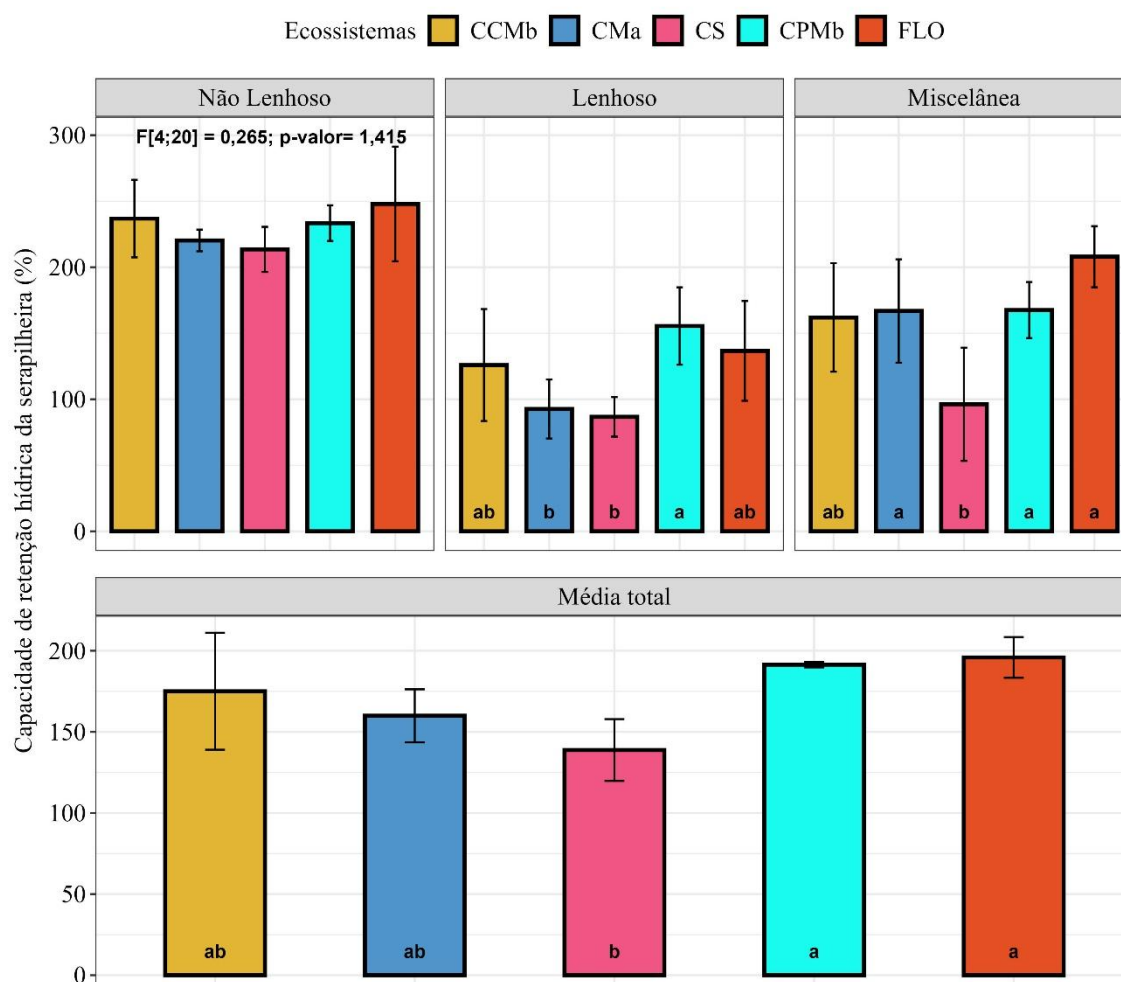


Figura 7. Média $\pm$ desvio padrão da capacidade de retenção hídrica da serapilheira de sistemas agroflorestais e floresta secundária no município de Tomé-Açu, Amazônia Oriental.

5.2. Nutrientes da serapilheira

A serrapilheira do sistema CCMb apresentou maior teor de nitrogênio em comparação à floresta secundária de referência ($z = 3,31$; $p = 0,0094$; Figura 8A), porém não diferiu dos demais sistemas. Além disso, apresentou maior teor de sódio ($z = 2,84$; $p = 0,0457$; Figura 8G) e potássio ($z = 2,84$; $p = 0,0457$; Figura 8C) em relação ao CPMb. Para o fósforo, o teste de Dunn com correção de Bonferroni não identificou diferenças significativas entre pares específicos (Figura 8B). Não foram detectadas diferenças significativas entre os ecossistemas para os teores de cálcio ($H_{(4)} = 9,26$; $p = 0,0550$).

Figura 8D), magnésio ($H_{(4)} = 5,50$; $p = 0,2397$; Figura 8E) e enxofre ($H_{(4)} = 9,26$; $p = 0,0550$; Figura 8F).

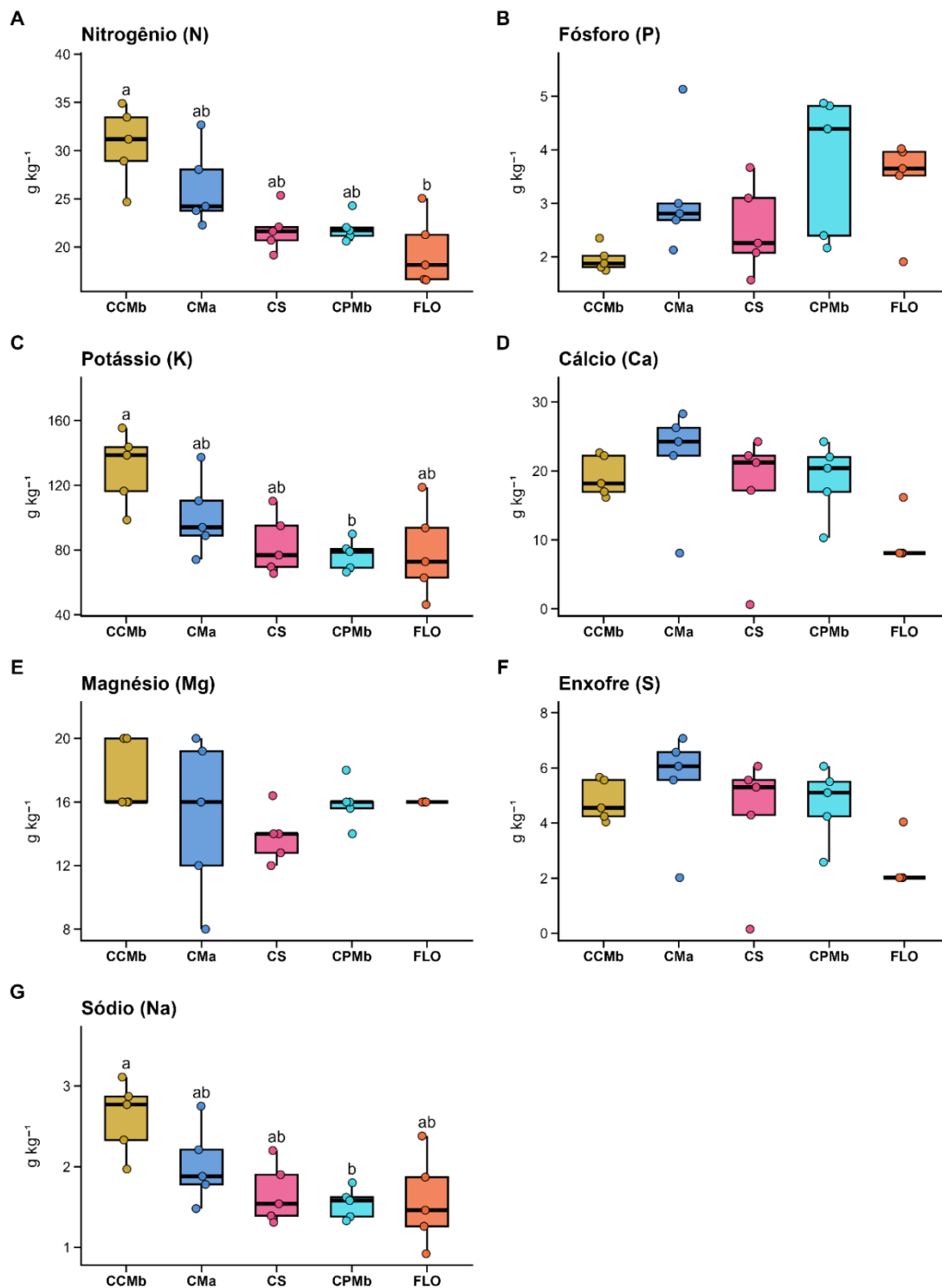


Figura 8. Teores de macronutrientes na serapilheira dos ecossistemas. As caixas representam a mediana e o intervalo interquartil; os pontos representam as parcelas. Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Dunn–Bonferroni ($p < 0,05$).

Para os micronutrientes, o CCMB apresentou maior teor de boro (Figura 9A) em comparação à floresta secundária ($z = 3,31$; $p = 0,0094$). Resultado semelhante foi observado para o molibdênio (Figura 9F), cujo teor também foi maior no CCMB em relação à floresta ($z = 3,33$; $p = 0,0086$). Para cobre, ferro, manganês, zinco e cloro não houve diferenças significativas entre os ecossistemas (Figura 9).

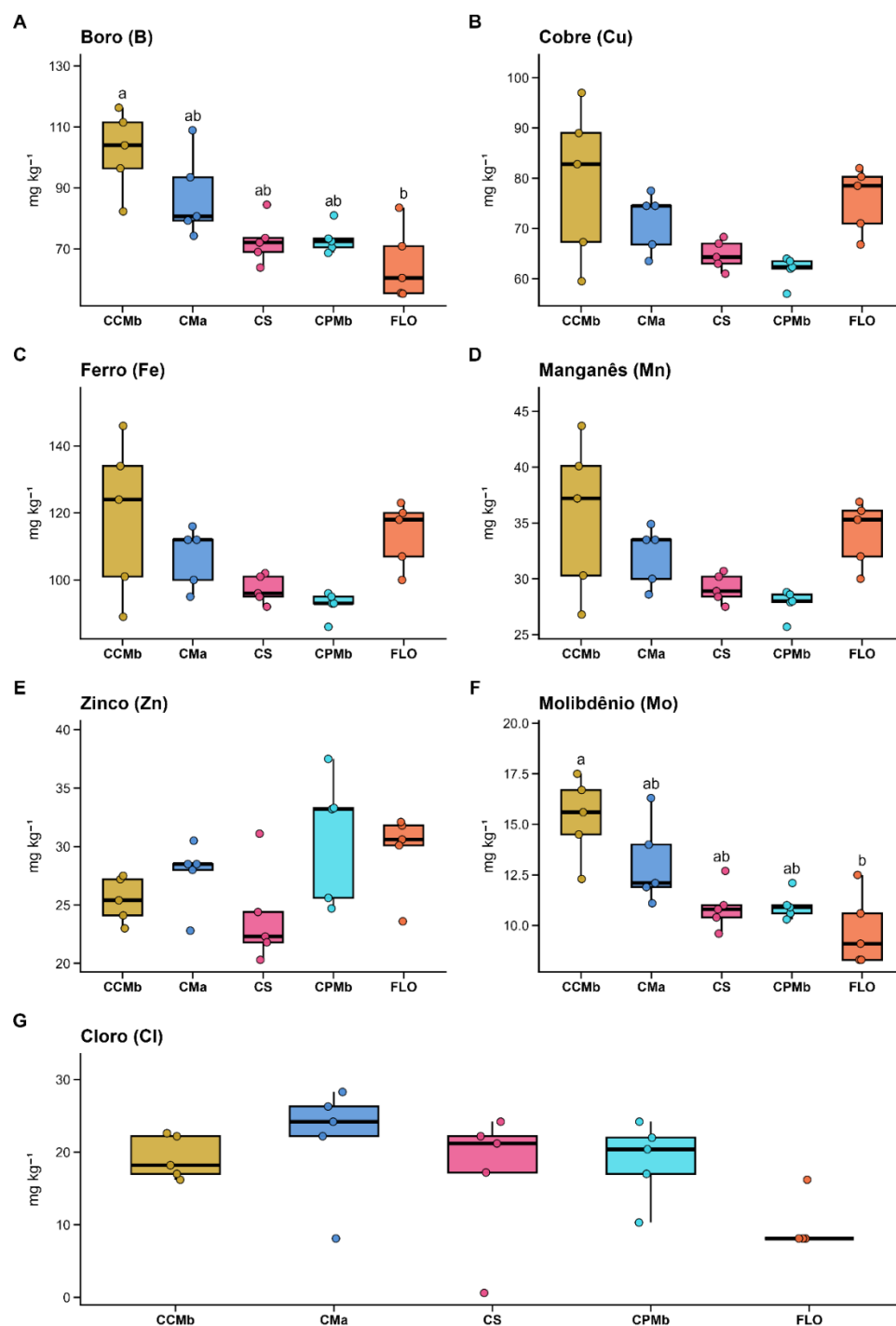


Figura 9. Teores de micronutrientes na serapilheira dos ecossistemas avaliados. As caixas representam a mediana e o intervalo interquartil; os pontos representam as parcelas. Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Dunn–Bonferroni ($p < 0,05$).

5.3. Fertilidade do solo

Para o pH do solo, o CPMb apresentou menor acidez em relação à FLO, tanto na camada superficial (0-10) ($z = -3,78$; $p = 0,0008$), quanto na camada mais profunda (10-20) ($z = -3,18$; $p = 0,0074$; Figura 10), enquanto o CCMb apresentou menor acidez apenas na camada mais profunda ($z = -4,03$; $p = 0,0003$; Figura 11). Já para o teor de matéria orgânica no solo foi observada diferença significativa entre os SAFs CPMb e CCMb na profundidade 0-10, ocorrendo maior teor no CPMb ($z = 3,22$; $p = 0,0063$; Figura 10). Na profundidade 10-20 houve diferença significativa para CMa ($z = -2,86$; $p = 0,0212$) e para o CPMb ($z = 3,44$; $p = 0,0029$; Figura 11).

Foram observados maiores valores de P em relação ao ecossistema florestal de referência para os CPMb ($z = -2,83$; $p = 0,0229$) e CCMb ($z = -4,30$; $p = 0,0001$) na profundidade 0-10 (Figura 10), ocorrendo somente para o CCMb na profundidade 10-20 ($z = -3,67$; $p = 0,0012$; Figura 11). Ademais, o CPMb apresentou maior acidez potencial em relação ao CCMb ($z = 2,96$; $p = 0,0151$) e menor em relação à FLO ($z = -3,39$; $p = 0,0034$) na profundidade 0-10 (Figura 10), ocorrendo diferença somente entre CPMb e CCMb na profundidade 10-20 (Figura 11) ($z = 3,27$; $p = 0,0054$). O teor de Mg foi significativamente menor na FLO em relação ao CCMb ($z = -2,015$; $p = 0,0128$) e ao CMa ($z = -4,00$; $p = 0,0003$) na profundidade 0-10 (Figura 10), havendo menor teor de Mg na FLO em relação ao CCMb na profundidade 10-20 ($z = -3,19$; $p = 0,0070$; Figura 11). Não houve diferença significativa para os teores de K entre os ecossistemas estudados em ambas as profundidades.

A soma de bases (SB) foi maior em CPMb ($z = -3,00$; $p = 0,0131$) e CCMb ($z = -2,83$; $p = 0,0228$) em relação à FLO na profundidade 0-10 (Figura 10), ocorrendo o mesmo na profundidade 10-20 (CPMb: $z = -3,31$; $p = 0,0046$; CCMb: $z = -3,35$; $p = 0,0040$; Figura 11). Observaram-se menores valores de T no ecossistema florestal em relação ao CPMb ($z = -3,46$; $p = 0,0027$) em ambas as profundidades e valor significativamente maior no CPMb em relação ao CS na profundidade 10-20 ($z = 3,54$; $p = 0,0020$; Figura 11). Saturação por alumínio (m) não apresentou diferença significativa na profundidade 0-10, porém foram observados menores valores no CPMb ($z = 2,83$; $p = 0,0229$) e no CCMb ($z = 3,65$; $p = 0,0013$) em relação à FLO (Figura 11).

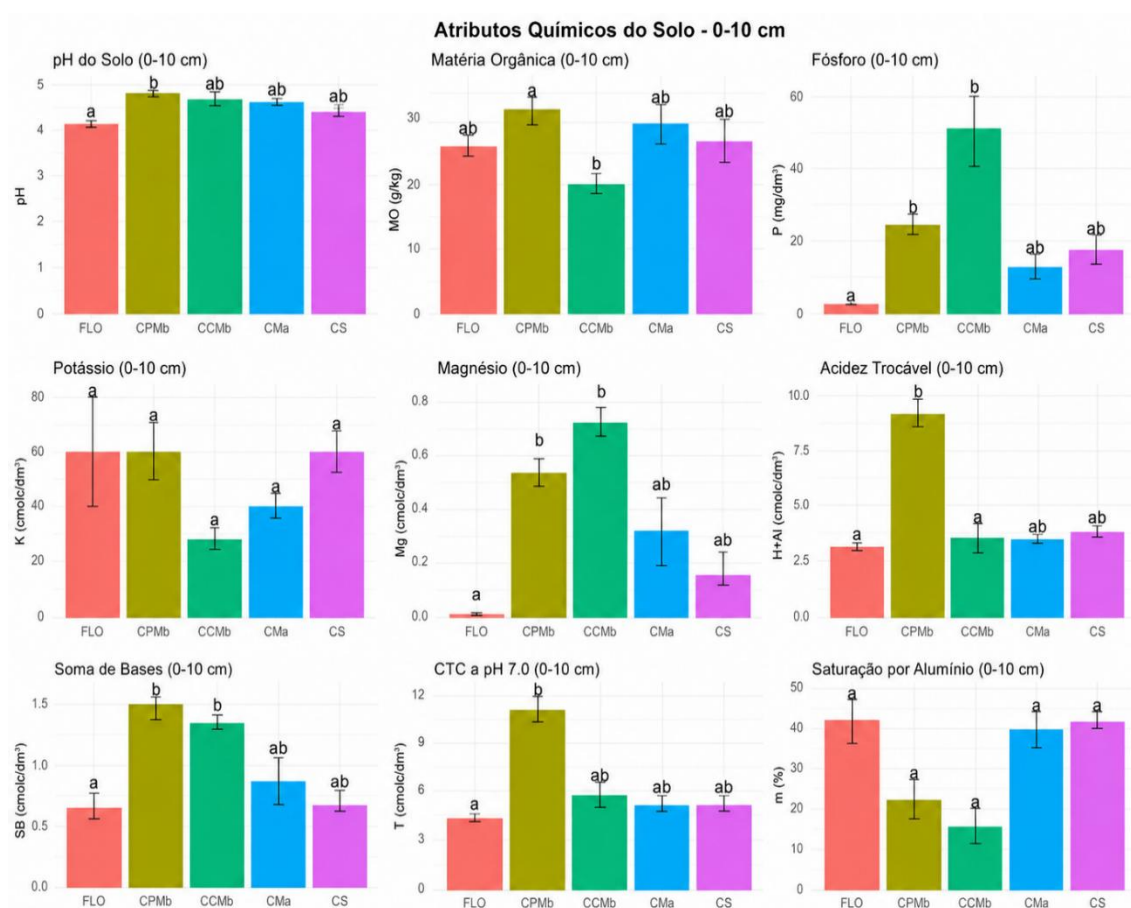


Figura 10. Atributos químicos do solo na camada de 0–10 cm nos sistemas FLO, CPMb, CCMb, CMa e CS. Valores médios de pH, matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), magnésio (Mg), acidez trocável ($H^+ + Al$), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC a pH 7,0) e saturação por alumínio (m). Barras representam as médias e as barras verticais indicam o erro associado. Letras minúsculas diferentes sobre as barras indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de comparação de médias, ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

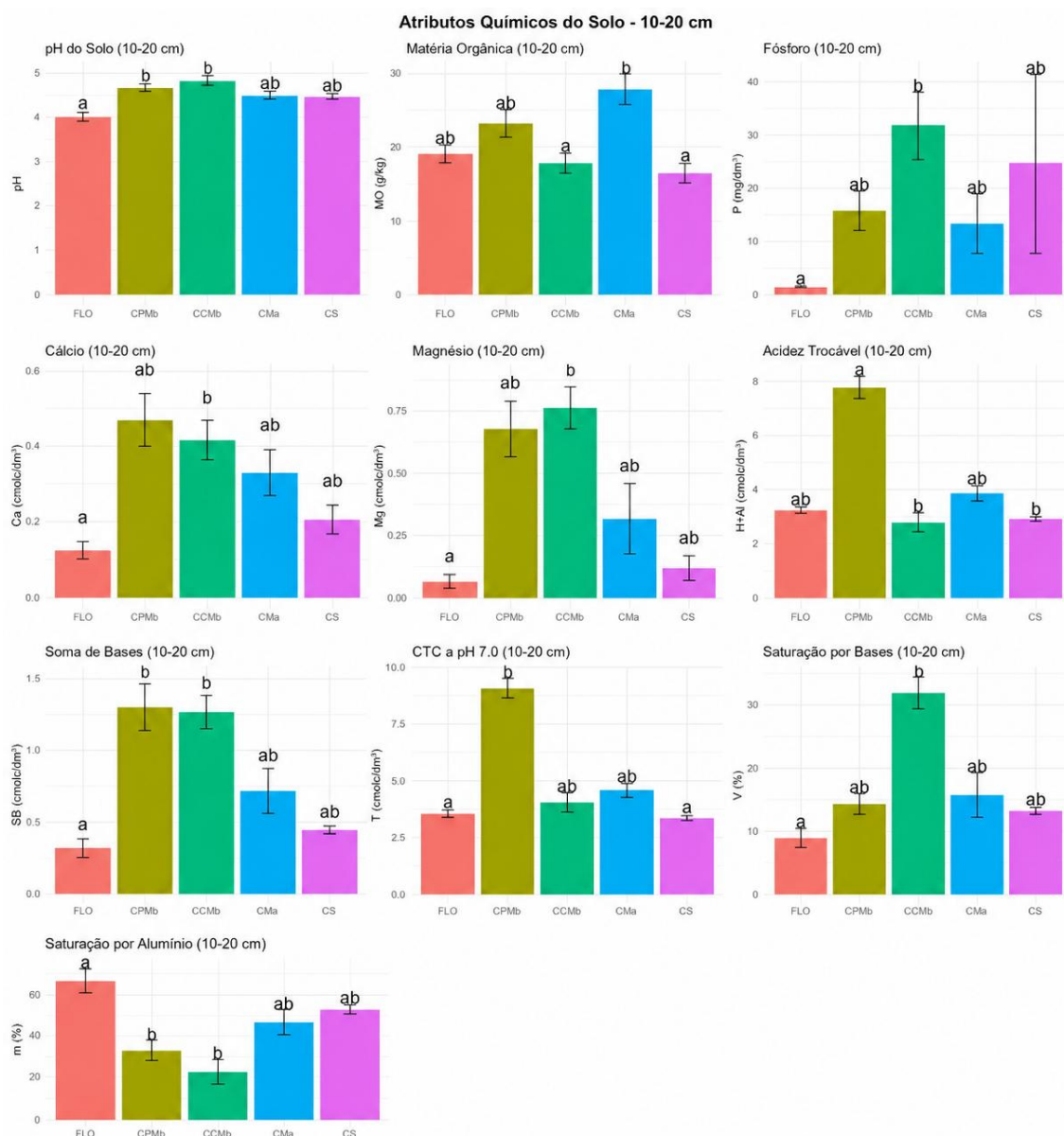


Figura 11. Atributos químicos do solo na camada de 10-20 cm nos sistemas FLO, CPMb, CCMB, CMA e CS. Valores médios de pH, matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), magnésio (Mg), acidez trocável ($H^+ + Al$), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC a pH 7,0) e saturação por alumínio (m). Barras representam as médias e as barras verticais indicam o erro associado. Letras minúsculas diferentes sobre as barras indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de comparação de médias, ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

6. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos indicaram diferenças no acúmulo de serapilheira entre os sistemas avaliados, evidenciando que a composição das espécies e as características particulares de cada área podem estar associadas à dinâmica de deposição e acúmulo desse material. O sistema CMA apresentou o maior estoque de serapilheira total ($12,50 \pm 2,48 \text{ Mg ha}^{-1}$), bem como o maior estoque da fração não lenhosa ($6,98 \pm 1,69 \text{ Mg ha}^{-1}$), que não diferiu estatisticamente do observado na FLO. Esse resultado pode estar

relacionado às características da composição vegetal e à dinâmica de deposição de resíduos do CMA, considerando a presença de espécies arbóreas com diferentes padrões de produção e renovação de folhas e outros componentes da serapilheira. Entretanto, como a estrutura da vegetação, a densidade de indivíduos, a área basal e o porte das árvores não foram mensurados neste estudo, não é possível atribuir o maior estoque exclusivamente a uma maior complexidade estrutural do sistema.

A proximidade entre as áreas avaliadas e o histórico de uso e ocupação da Fazenda Matsunaga também devem ser considerados na interpretação desses resultados. Nesse contexto, a FLO foi utilizada como referência para a comparação entre os sistemas, mas sua condição não deve ser interpretada necessariamente como um modelo de maior qualidade ou de funcionamento ideal, uma vez que os ambientes avaliados apresentam histórico e condições locais particulares e podem compartilhar características decorrentes de sua proximidade espacial e de um histórico anterior de continuidade da cobertura vegetal. Assim, a semelhança observada entre CMA e FLO para a fração não lenhosa indica que, nas condições específicas deste estudo, esses ambientes apresentaram padrões semelhantes de acúmulo dessa fração, sem que isso implique equivalência estrutural ou funcional entre os ecossistemas.

Dessa forma, os resultados sugerem que o acúmulo de serapilheira está associado às particularidades florísticas e às condições locais de cada sistema, devendo sua interpretação considerar também aspectos como densidade da vegetação, composição e identidade das espécies, padrões de deposição e decomposição. O elevado estoque de serapilheira observado no sistema CMA pode estar associado às características das espécies arbóreas presentes, especialmente à maior produção de biomassa aérea e ao aporte contínuo de resíduos vegetais ao solo.

A presença de árvores de grande porte também modifica o microclima sob o dossel, reduzindo a incidência de radiação solar, atenuando a velocidade do vento e favorecendo a manutenção de maior umidade relativa do ar. Essas condições podem reduzir a velocidade de decomposição da serapilheira, prolongando seu tempo de permanência sobre o solo e favorecendo seu acúmulo superficial (ISAAC et al., 2024; NIETHER et al., 2018). Em sistemas agroflorestais com maior cobertura arbórea, o equilíbrio entre a deposição do material vegetal e a decomposição geralmente resulta em maiores estoques de serapilheira quando comparados a sistemas menos diversificados ou com menor densidade de árvores, contribuindo para a proteção do solo e para a manutenção da ciclagem de nutrientes (SARI et al., 2022).

No entanto, os resultados obtidos sugerem que a riqueza de espécies, isoladamente, não foi suficiente para explicar o desempenho dos sistemas agroflorestais. Embora o CMA apresente apenas duas espécies arbóreas principais, este sistema apresentou o maior estoque total de serapilheira, enquanto o CPMb, constituído por três espécies, apresentou o menor estoque. De forma semelhante, em outro trabalho verificou-se que o aumento da diversidade de árvores não resultou necessariamente em maior fertilidade do solo em sistemas de cacau (WARTENBERG et al., 2017). Além disso, estudos de decomposição demonstram que a composição das espécies pode exercer influência mais importante que a riqueza sobre a dinâmica da serapilheira (BALL et al., 2010). Dessa forma, os resultados deste estudo reforçam que a avaliação do funcionamento de sistemas agroflorestais deve considerar não apenas o número de espécies, mas também sua identidade, abundância, estrutura do dossel e características funcionais da serapilheira.

Esse comportamento pode estar relacionado às características da composição e estrutura da vegetação, que podem influenciar a quantidade de biomassa aportada ao solo e as condições ambientais sob o dossel. Alterações no microambiente podem, por sua vez, afetar a dinâmica de decomposição da serapilheira e o balanço entre seus aportes e perdas, contribuindo para diferenças no estoque acumulado sobre o solo (SARI et al., 2022; KERDRAON et al., 2020; CASTILLO-FIGUEROA, 2025). Neste estudo, as diferenças observadas no estoque e na capacidade de retenção hídrica da serapilheira entre os sistemas avaliados evidenciam a importância da dinâmica desse componente para o funcionamento dos ecossistemas. Embora as características estruturais da vegetação e as condições microclimáticas não tenham sido avaliadas diretamente, a literatura indica que esses fatores podem contribuir para explicar variações na produção, decomposição e permanência da serapilheira sobre o solo (BERG; McCLAUGHERTY, 2020; PRESCOTT, 2010). Outro aspecto importante que está relacionado às taxas de decomposição da serapilheira é a composição desse material, em que a combinação de diferentes resíduos pode culminar em baixa ou alta qualidade, acelerando ou retardando a degradação da matéria orgânica, levando em consideração todos os componentes dessa interação (SARI et al., 2022).

O predomínio da fração não lenhosa está de acordo com o comportamento esperado para ecossistemas florestais tropicais, onde as folhas geralmente constituem de 60 a 80% da serapilheira acumulada, sendo responsáveis pela maior parte do retorno de nutrientes ao solo devido à elevada taxa de renovação foliar e à rápida decomposição

desse material (SANTOS et al., 2022). Isso foi observado especialmente no CMa e na FLO, nos quais a serapilheira é predominantemente composta por folhas, as quais são responsáveis pela maior parte do aporte de matéria orgânica ao solo. A deposição contínua desse material, associada à sua decomposição gradual, representa o principal mecanismo de reposição da matéria orgânica do solo, contribuindo para a manutenção da cobertura do solo, para a ciclagem de nutrientes e para a sustentabilidade do sistema (SARI et al., 2022).

A maior participação da fração não lenhosa também pode apresentar implicações importantes para a proteção física do solo, uma vez que essa fração atua como cobertura superficial, dissipando a energia das gotas de chuva, reduzindo o selamento e a desagregação do solo, além de favorecer a infiltração e reduzir o escoamento superficial. Dessa forma, a manutenção de uma camada de serapilheira sobre o solo pode contribuir para a conservação da água e para a manutenção de condições mais favoráveis de umidade no solo (XIA et al., 2019). Além disso, essa cobertura proporciona condições favoráveis à atividade da fauna edáfica, incluindo organismos decompositores que atuam na fragmentação e incorporação gradual da matéria orgânica ao solo (BERG; McCLAUGHERTY, 2020; PRESCOTT, 2010). Como consequência desses processos, ocorre maior incorporação de matéria orgânica e favorecimento da estabilidade dos agregados do solo, aumentando sua capacidade de retenção de água e contribuindo para a melhoria de sua estrutura física.

Em contrapartida, o menor estoque total de serapilheira observado no SAF CPMb ($4,18 \pm 1,33 \text{ Mg ha}^{-1}$) não deve ser interpretado, isoladamente, como indicativo de menor eficiência ou funcionamento desfavorável do sistema. A quantidade de serapilheira acumulada sobre o solo resulta do balanço entre o aporte contínuo de resíduos vegetais e sua decomposição, de modo que baixos estoques podem estar associados tanto a menor produção de material quanto a uma maior taxa de decomposição e, conseqüentemente, a um menor tempo de permanência dos resíduos na superfície do solo (SARI et al., 2022; GIWETA, 2020).

Nesse sentido, características estruturais do sistema, como a maior abertura do dossel, podem contribuir para alterações nas condições microclimáticas do ambiente e, potencialmente, influenciar a dinâmica de decomposição da serapilheira. Maior incidência de radiação sobre o solo pode favorecer condições de maior temperatura e menor retenção de umidade na camada superficial, condições que, dependendo da interação com outros fatores ambientais e da qualidade do material vegetal, podem

favorecer a atividade dos organismos decompositores e acelerar a decomposição (CÂMARA et al., 2019). Entretanto, como as condições microclimáticas e as taxas de decomposição não foram mensuradas no presente estudo, essa relação deve ser considerada como uma hipótese explicativa, e não como uma causa diretamente demonstrada para o menor estoque observado no CPMb.

Por outro lado, o comportamento observado no SAF CMa, que apresentou elevado estoque total de serapilheira, mas não apresentou a maior capacidade de retenção hídrica, demonstra que maior acúmulo de material não implica, necessariamente, maior capacidade de retenção de água. A capacidade de retenção hídrica depende não apenas da quantidade de serapilheira acumulada, mas também da composição e das características físicas das frações que constituem esse estoque, por exemplo, diferentes frações da serapilheira apresentam capacidades distintas de retenção de água, evidenciando que a estrutura do material acumulado é importante para determinar seu comportamento hidrológico (SANTOS et al., 2017). Em sistemas agroflorestais, diferentes espécies podem apresentar taxas distintas de perda de massa e de liberação de nutrientes, fazendo com que menores estoques não estejam necessariamente associados a menor contribuição ecológica da serapilheira (TZEC-GAMBOA et al., 2023; SARI et al., 2022).

Na fração lenhosa, os valores observados em FLO ($2,95 \pm 0,56 \text{ Mg ha}^{-1}$), CMa ($1,80 \pm 1,09 \text{ Mg ha}^{-1}$) e CS ($2,41 \pm 0,82 \text{ Mg ha}^{-1}$) indicam estoques relativamente próximos entre esses sistemas, o que pode estar relacionado à presença de materiais vegetais de maior dimensão e, potencialmente, de maior recalcitrância, cuja decomposição tende a ocorrer de forma mais lenta (PRESCOTT, 2010). A permanência desses resíduos sobre o solo pode contribuir para a manutenção de matéria orgânica na superfície e, em determinadas condições, favorecer a retenção de carbono nesse compartimento. Além disso, a cobertura proporcionada pela serapilheira exerce importante função física na proteção da superfície do solo, reduzindo a exposição direta ao impacto das gotas de chuva e, conseqüentemente, podendo contribuir para a redução de processos erosivos e para a conservação de sua estrutura superficial (XIA et al., 2019).

Outro aspecto relevante é a interação entre a serapilheira e a atividade biológica do solo. A macrofauna edáfica participa das etapas iniciais da decomposição, especialmente por meio da fragmentação dos resíduos vegetais, aumentando a superfície de contato do material e favorecendo sua posterior transformação pela comunidade

microbiana. Esse processo contribui para a ciclagem de nutrientes e para a incorporação gradual de matéria orgânica ao solo (OYEDELE et al., 2025). Dessa forma, a elevada produção de serapilheira observada nos sistemas avaliados representa um importante aporte de biomassa ao solo e pode ampliar a disponibilidade de substratos para os organismos decompositores, contribuindo para a dinâmica da matéria orgânica e da ciclagem de nutrientes. A manutenção desses processos é particularmente relevante para o funcionamento e a sustentabilidade dos sistemas agroflorestais, embora a magnitude dessas contribuições dependa da qualidade dos resíduos, das condições ambientais e da atividade da comunidade decompositora (BERG; McCLAUGHERTY, 2020; PRESCOTT, 2010).

Embora o estoque de serapilheira represente um importante indicador do aporte de biomassa sobre o solo, sua contribuição para o funcionamento hidrológico dos ecossistemas depende, sobretudo, da capacidade desse material de interceptar, armazenar e liberar gradativamente a água proveniente das chuvas (ROSALEM et al., 2019). A capacidade de retenção hídrica (CRH) variou entre as frações da serapilheira, indicando que a quantidade de material acumulado não foi o único fator associado ao comportamento hídrico da serapilheira. As diferenças observadas entre os sistemas podem estar relacionadas às características das frações que compõem esse material, incluindo sua composição e estrutura física, que podem influenciar a capacidade de retenção e armazenamento de água.

O estoque de serapilheira acumulado, embora represente um importante componente para a regulação hidrológica dos ecossistemas, não constitui isoladamente o principal fator responsável pela capacidade de retenção de água. A eficiência hidrológica da serapilheira não está relacionada apenas à quantidade de material acumulado, mas principalmente às características estruturais e funcionais do material acumulado, incluindo a composição do material vegetal, densidade e composição química do material e grau de decomposição dos resíduos, fatores esses que influenciam diretamente a capacidade de absorver e armazenar água (FACELLI; PICKETT, 1991; CASTAGNOLLI et al., 2023). Assim, materiais com maior capacidade de retenção específica podem armazenar maiores volumes de água mesmo quando apresentam menor estoque total de biomassa acumulada.

Nesse sentido, a qualidade da serapilheira pode exercer maior influência sobre a dinâmica hídrica do que sua quantidade absoluta, uma vez que materiais com maior superfície específica, maior porosidade e maior proporção de matéria orgânica

parcialmente decomposta apresentam maior capacidade de retenção de água (SANTOS et al., 2023; CASTAGNOLLI et al., 2023). Assim, ambientes que apresentam menor estoque acumulado de serapilheira podem, ainda assim, apresentar elevada capacidade de retenção hídrica quando a composição e as características físicas do material favorecem maior armazenamento de água.

Os atributos químicos do solo apresentaram variações entre os sistemas avaliados, com diferenças na disponibilidade de alguns nutrientes, enquanto outras variáveis apresentaram comportamento semelhante entre os SAFs e a floresta secundária. Esse resultado é relevante considerando que a conversão de ecossistemas naturais para sistemas agrícolas pode promover alterações expressivas no carbono orgânico e na fertilidade do solo (Silva et al., 2024). Porém, sistemas agroflorestais buscam manter funções que se assemelhem às de ecossistemas florestais; a adoção desses sistemas agroflorestais pode favorecer a manutenção da qualidade do solo por meio do maior aporte de matéria orgânica (PAES et al., 2020). A semelhança observada entre os SAFs e a FLO para diversos atributos do solo pode estar relacionada à manutenção do componente arbóreo e da cobertura orgânica nesses sistemas, que podem contribuir para a conservação das características edáficas. Entretanto, considerando o histórico de uso das áreas e o tempo de estabelecimento dos sistemas agroflorestais, não se pode descartar que parte dessas semelhanças esteja associada à persistência de características pré-existentes do solo ou ao tempo ainda insuficiente para que diferenças mais marcantes entre os sistemas fossem estabelecidas.

A matéria orgânica (MO) não apresentou diferenças significativas entre os sistemas nas duas profundidades avaliadas, indicando comportamento semelhante dessa variável entre as áreas analisadas. Por sua relação com a disponibilidade de nutrientes e com a fertilidade do solo, a MO constitui um importante componente da qualidade química em áreas cultivadas com cacaueteiro (MANRIQUE et al., 2024). Em sistemas agroflorestais, a presença de diferentes componentes vegetais pode favorecer o aporte contínuo de resíduos ao solo, provenientes da deposição de folhas, galhos e outros materiais vegetais. Esse aporte pode contribuir para a manutenção da matéria orgânica, conforme observado por Paes et al. (2020) em sistemas agroflorestais submetidos à comparação com outros usos do solo. Contudo, a ausência de diferenças entre os sistemas avaliados também pode estar relacionada às características preexistentes das áreas e ao tempo de estabelecimento dos SAFs, de modo que os resultados não

permitem atribuir exclusivamente ao manejo agroflorestal a manutenção dos teores de MO observados.

Nos sistemas com cacauieiro, a decomposição da serapilheira participa da dinâmica da matéria orgânica nas camadas superficiais do solo, pois os resíduos depositados na superfície são progressivamente fragmentados e transformados pela atividade dos organismos decompositores, liberando compostos orgânicos e nutrientes que podem ser incorporados ao solo e contribuir para a manutenção de seu estoque de matéria orgânica (COSTA et al., 2018; PRESCOTT, 2010). Dessa forma, a quantidade e a qualidade da serapilheira depositada sobre o solo podem influenciar a dinâmica da matéria orgânica, especialmente nas camadas mais superficiais. Assim, a manutenção de estoques de serapilheira nos SAFs avaliados pode contribuir para compreender a proximidade dos teores de MO em relação à floresta secundária.

A acidez do solo apresentou comportamento semelhante entre os SAFs e a FLO. Embora os valores de pH não tenham diferido significativamente entre os sistemas nas duas profundidades avaliadas, a maior acidez potencial ($H+Al$) observada na camada superficial da FLO indica que a semelhança quanto à acidez ativa não necessariamente representa condições equivalentes de reserva de acidez no solo. Isso ocorre porque o pH representa a acidez ativa da solução do solo, enquanto a acidez potencial está associada a formas de H^+ e Al retidas na fase sólida, que podem ser liberadas gradualmente para a solução. Em solos tropicais, essas formas de acidez podem variar em função das características da matéria orgânica, da mineralogia e da capacidade de troca de cátions, fazendo com que solos com pH semelhante apresentem diferentes reservas de acidez (ABREU et al., 2003; COSTA et al., 2018).

As diferenças na composição e na cobertura vegetal podem contribuir para a formação de condições químicas distintas no solo, uma vez que a quantidade e a qualidade dos resíduos depositados, associadas à ciclagem de nutrientes, podem influenciar a dinâmica de bases trocáveis e da acidez do solo (SILVA et al., 2024). Em SAFs de cacau, a identidade das espécies utilizadas como árvores de sombra também pode contribuir para diferenças nos atributos edáficos, reforçando que o componente arbóreo não exerce apenas função de sombreamento, mas pode participar da dinâmica química do solo por meio das características dos resíduos e dos processos de ciclagem associados à vegetação (DANSO et al., 2026).

Para os nutrientes, os resultados demonstraram que a aproximação dos SAFs à floresta não ocorreu de maneira uniforme, havendo respostas distintas de acordo com o

arranjo vegetal. Na camada de 0–10 cm, o CMa apresentou os maiores valores de P ($5,57 \text{ mg dm}^{-3}$) e K ($69,33 \text{ mg dm}^{-3}$), enquanto a FLO apresentou $3,73$ e $40,00 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente. O CMa também foi o sistema com maior estoque total de serapilheira, permitindo associar esses dois resultados dentro da dinâmica de ciclagem de nutrientes. A decomposição e mineralização da serapilheira promovem o retorno de macro e micronutrientes ao solo, estabelecendo uma conexão direta entre o componente de serapilheira avaliado e as alterações observadas nos atributos químicos do solo (ASIGBAASE et al., 2021). Dessa forma, o elevado estoque de serapilheira observado no CMa pode representar um importante fator na ciclagem e manutenção de nutrientes nesse sistema.

A composição do componente arbóreo pode contribuir para explicar as diferenças observadas entre os SAFs quanto aos atributos de fertilidade do solo, embora esse efeito não tenha sido avaliado diretamente neste estudo. A identidade e as características funcionais das espécies de sombra podem influenciar a dinâmica de nutrientes por meio da quantidade e da qualidade da serapilheira depositada, bem como de sua decomposição e dos processos de ciclagem associados. Em sistemas agroflorestais com cacaueteiro, diferenças na composição das árvores de sombra têm sido relacionadas a variações nas propriedades químicas do solo, incluindo carbono orgânico, nitrogênio, fósforo e pH (ASITOAKOR et al., 2022; ISAAC et al., 2024). De forma mais específica, evidências obtidas em agroflorestas de cacau sugerem que os atributos funcionais da serapilheira das árvores de sombra podem contribuir para a variação da fertilidade do solo, uma vez que a qualidade do material vegetal influencia sua decomposição e a dinâmica de disponibilização de nutrientes no sistema (SAUVADET et al., 2020).

Nesse contexto, o maior estoque de serapilheira observado no CMa pode estar associado às características da composição vegetal desse sistema, especialmente à contribuição de *Theobroma cacao* e *Khaya grandifoliola*, que podem apresentar diferentes padrões de deposição de material vegetal. Assim, o maior acúmulo registrado pode refletir não apenas a quantidade de resíduos aportados, mas também as características do material depositado e sua permanência sobre o solo (SARI et al., 2022). A composição química e os atributos funcionais da serapilheira podem influenciar sua decomposição e a dinâmica de ciclagem de nutrientes, contribuindo para diferenças no funcionamento dos sistemas agroflorestais (SAUVADET et al., 2020).

Essa hipótese, entretanto, requer avaliação específica dos atributos funcionais e da dinâmica de decomposição da serapilheira de *Khaya grandifoliola*.

Esse resultado é particularmente interessante porque o CPMb apresentou o menor estoque total de serapilheira entre os ecossistemas avaliados. Assim, a quantidade de material acumulado sobre o solo, isoladamente, não explica a disponibilidade dos diferentes nutrientes. As espécies arbóreas podem apresentar diferenças quanto à influência exercida sobre os atributos químicos do solo (DANSO et al., 2026), enquanto características químicas da serapilheira, como a concentração e a restituição de cálcio, podem estar associadas a variações nas propriedades do solo sob diferentes espécies de sombra em sistemas de cultivo de cacau (SAUVADET et al., 2020). Nesse contexto, as diferenças observadas no CPMb podem estar relacionadas, entre outros fatores, à composição vegetal desse arranjo, formado por cacau, piquiá e mogno brasileiro, cujas características individuais podem resultar em diferentes padrões de aporte e devolução de nutrientes ao solo. Entretanto, como a ciclagem de nutrientes não foi avaliada diretamente, essa relação deve ser considerada como uma possibilidade para explicar o comportamento observado, e não como uma evidência de que a composição do CPMb tenha determinado diferenças na ciclagem de bases.

Por fim, a distribuição dos atributos entre as profundidades reforça a importância das camadas superficiais na disponibilidade de nutrientes desses ecossistemas. De maneira geral, MO, P e K apresentaram maiores valores em 0–10 cm do que em 10–20 cm, embora a magnitude desse comportamento tenha variado entre os sistemas. Essa concentração superficial é coerente com a deposição da serapilheira na superfície e sua posterior decomposição, processo capaz de influenciar intensamente os primeiros centímetros do solo em sistemas agroflorestais de cacau (COSTA et al., 2018). A decomposição e mineralização da serapilheira promovem o retorno de macro e micronutrientes ao solo (ASIGBAASE et al., 2020), estabelecendo uma conexão direta entre o compartimento de serapilheira avaliado neste estudo e a manutenção da fertilidade superficial.

Em conjunto, os resultados evidenciam que os atributos químicos do solo apresentaram respostas distintas entre os sistemas avaliados. Para algumas variáveis, como matéria orgânica e pH, não foram observadas diferenças significativas entre os SAFs e a floresta secundária, enquanto determinados arranjos apresentaram maior disponibilidade de nutrientes específicos. Esse padrão indica que a composição química do solo não respondeu de forma uniforme aos diferentes arranjos vegetais, refletindo as

particularidades de cada sistema e das condições locais em que estão estabelecidos. A ausência de diferenças em algumas variáveis também pode estar relacionada à persistência de características pré-existentes do solo, ao histórico de uso das áreas e ao tempo de estabelecimento dos SAFs, fatores que podem contribuir para a manutenção de condições semelhantes entre os ambientes.

Nesse contexto, a composição das espécies arbóreas constitui um possível fator associado às diferenças observadas entre os sistemas. Estudos realizados em agroflorestas de cacau indicam que as características funcionais das espécies podem influenciar o aporte e a qualidade da serapilheira, a arquitetura do dossel e a disponibilidade de nutrientes, contribuindo para diferenças nas condições químicas e no funcionamento do solo (SAUVADET et al., 2020; WARTENBERG et al., 2017; ASITOAKOR et al., 2022; ISAAC et al., 2024). Assim, as variações observadas entre os SAFs podem estar relacionadas às particularidades da composição vegetal de cada arranjo, embora os resultados obtidos não permitam estabelecer uma relação causal direta entre a presença de determinadas espécies e as alterações nos atributos químicos avaliados.

7. CONCLUSÃO

Observou-se que a riqueza de espécies, quando considerada isoladamente, não foi suficiente para explicar o desempenho dos sistemas nas variáveis avaliadas, indicando que a identidade das espécies, a estrutura do dossel, a quantidade e a qualidade da serapilheira, a idade e o histórico de manejo podem atuar conjuntamente na determinação das funções ecológicas dos SAFs. Nesse sentido, os resultados reforçam que a diversificação dos sistemas agroflorestais não deve ser compreendida apenas pelo aumento do número de espécies, mas pela seleção de combinações vegetalmente e funcionalmente complementares, capazes de favorecer diferentes processos relacionados à proteção do solo, retenção hídrica e ciclagem de nutrientes. De modo geral, os SAFs avaliados mantiveram importantes atributos químicos do solo em condições comparáveis às observadas na floresta secundária e apresentaram capacidade de sustentar funções associadas à acumulação e retenção de água pela serapilheira e à manutenção da fertilidade do solo, evidenciando o potencial desses sistemas para conciliar a produção de cacau com a conservação dos recursos edáficos e a sustentabilidade dos agroecossistemas na Amazônia Oriental.

8. REFERÊNCIAS

- ABREU, C. H. J.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A. F. Relações entre acidez e propriedades químicas de solos brasileiros. *Scientia Agricola*, v. 60, n. 2, p. 337–343, 2003.
- ALEIXO, S.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; SCHIPSEMA, J. Organic phosphorus of soils under cacao agroforests in the Atlantic coast of Brazil. *Geoderma Regional*, v. 17, e00220, 2019.
- ALFAIA, S. S.; RIBEIRO, G. A.; NOBRE, A. D.; LUIZÃO, R. C.; LUIZÃO, F. J. Evaluation of soil fertility in smallholder agroforestry systems and pastures in western Amazonia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 102, n. 3, p. 409–414, 2004.
- ARMENGOT, L.; FERRARI, L.; MILZ, J.; VELÁSQUEZ, F.; HOHMANN, P.; SCHNEIDER, M. Cacao agroforestry systems do not increase pest and disease incidence compared with monocultures under good cultural management practices. *Crop Protection*, v. 130, 105047, 2020.
- ASIGBAASE, M.; DAWOE, E.; SJÖGERSTEN, S.; LOMAX, B. H. Decomposition and nutrient mineralisation of leaf litter in smallholder cocoa agroforests: a comparison of organic and conventional farms in Ghana. *Journal of Soils and Sediments*, v. 21, p. 1010–1023, 2021.
- ASITOAKOR, B. K.; VAAST, P.; RÆBILD, A.; RAVN, H. P.; EZIAH, V. Y.; OWUSU, K.; MENSAH, E. O.; ASARE, R. Selected shade tree species improved cocoa yields in low-input agroforestry systems in Ghana. *Agricultural Systems*, v. 202, art. 103476, 2022.
- BARROS, A. V. L. de; HOMMA, A. K. O.; TAKAMATSU, J. A.; TAKAMATSU, T.; KONAGANO, M. Evolução e percepção dos sistemas agrofloreais desenvolvidos pelos agricultores nipo-brasileiros do município de Tomé-Açu, estado do Pará. *Amazônia: Ciência & Desenvolvimento*, Belém, PA, v. 5, n. 9, p. 121–151, 2009.
- BARROSO, A. C. Sistema agroflorestral: uma alternativa sustentável no agronegócio. *Revista de Economia da UEG*, v. 13, n. 1, p. 277–293, 2017.
- BASTOS, T. R. S.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; MENDES, I. C.; MONROE, P. H. M.; CARVALHO, F. F. Response of soil microbial biomass and enzyme activity in coffee-based agroforestry systems in a high-altitude tropical climate region of Brazil. *Catena*, v. 230, 107270, 2023.
- BÉLIVEAU, A. et al. Reduction of soil erosion and mercury losses in agroforestry systems compared to forests and cultivated fields in the Brazilian Amazon. *Journal of Environmental Management*, v. 203, p. 522–532, 2017.
- BERG, B.; McCLAUGHERTY, C. Plant litter: decomposition, humus formation, carbon sequestration. 4. ed. Cham: Springer, 332 p. 2020.
- BOLFE, É. L.; BATISTELLA, M. Análise florística e estrutural de sistemas silviagrícolas em Tomé-Açu, Pará. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 46, n. 10, p. 1139–1147, 2011.
- BURGESS, A. J.; CORREA CANO, M. E.; PARKES, B. The deployment of intercropping and agroforestry as adaptation to climate change. *Crop and Environment*, v. 1, n. 2, p. 145–160, 2022.

- CAICEDO-VARGAS, C.; PÉREZ-NEIRA, D.; ABAD-GONZÁLEZ, J.; GALLAR, D. Assessment of the environmental impact and economic performance of cacao agroforestry systems in the Ecuadorian Amazon region: An LCA approach. *Science of the Total Environment*, v. 849, 157795, 2022.
- CALDEIRA, M. V. W.; SILVA, R. D. da; KUNZ, S. H.; ZORZANELLI, J. P. F.; CASTRO, K. C.; GODINHO, T. de O. Biomassa e nutrientes da serapilheira em diferentes coberturas florestais. *Comunicata Scientiae*, v. 4, n. 2, p. 111–119, 2013.
- CAMARA, R.; SILVA, V. D.; CORREIA, M. E. F.; VILLELA, D. M. Impacto da remoção de serapilheira sobre a comunidade de artrópodes edáficos em plantios abandonados de *Corymbia citriodora*. *Ciência Florestal*, v. 29, p. 14–26, 2019.
- CASTILLO-FIGUEROA, D. The effect of forest microenvironment on litter decomposition in the Andean tropical mountains. *Journal of Forestry Research*, v. 36, art. 102, 2025.
- CLOUGH, Y.; FAUST, H.; TSCHARNTKE, T. Cacao boom and bust: sustainability of agroforests and opportunities for biodiversity conservation. *Conservation Letters*, v. 2, n. 5, p. 197–205, 2009.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução CONAMA Nº 004, de 04 de maio de 1994. Acesso em 22 de maio de 2025. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0004-040594.PDF>.
- CORDEIRO, I. M. C. C.; RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.; SCHWARTZ, G. O manejo da floresta secundária na Amazônia Oriental. In: CORDEIRO, I. M. C. C.; RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.; SCHWARTZ, G.; OLIVEIRA, F. de A. (org.). *Nordeste Paraense: panorama geral e uso sustentável das florestas secundárias*. Belém, PA: EDUFRA, 2017. p. 163–190.
- CORREIA, M.E.F.; ANDRADE, A.G. Formação de serapilheira e ciclagem de nutrientes. In: (Eds.). SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. *Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Genesis, 1999.
- COSTA, E. N. D.; LANDIM DE SOUZA, M. F.; LIMA MARROCOS, P. C.; LOBÃO, D.; LOPES DA SILVA, D. M. Soil organic matter and CO₂ fluxes in small tropical watersheds under forest and cacao agroforestry. *PLOS ONE*, v. 13, n. 7, 2018.
- DANSO, J.; ULZEN, J.; SARKODIE-ADDU, J.; OPOKU-AGYEMAN, M. O.; ARTHUR, A. Influence of tree species and specific distances on earthworm population and soil properties in cocoa (*Theobroma cacao* L.) agroforestry. *African Journal of Ecology*, v. 64, n. 1, e70125, 2026.
- DENG, P.; FAN, W.; WANG, H.; TI, J.; XU, X. Chinese *Torreya* agroforestry alters the rhizosphere soil bacterial communities and potential functions. *Applied Soil Ecology*, v. 177, 104504, 2022.
- DOLÁCIO, C. J. F. et al. Does using soil chemical variables in cokriging improve the spatial modelling of the commercial wood volume of Brazilian mahogany in an Amazonian agroforestry system? *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 180, n. April 2020, 2021.
- FACELLI, J. M.; PICKETT, S. T. A. Plant litter: Its dynamics and effects on plant community structure. *The Botanical Review*, v. 57, n. 1, p. 1–32, jan. 1991.

- FENG, Y.; ZHAO, Y.; ZHANG, D.; ZHANG, B.; FAN, X.; HAN, Z.; ZHAO, L. Response of water retention characteristics in litters based on the leaf type. *Hydrology Research*, v. 56, n. 4, p. 297–304, 2025.
- FLORES, B. M.; OLIVEIRA, R. S.; ROWLAND, L.; QUESADA, C. A.; LAMBERS, H. Editorial special issue: plant-soil interactions in the Amazon rainforest. *Plant and Soil*, v. 450, n. 1–2, p. 1–9, 2020.
- FREIRE, G.; VENTURA, D.; FOTOPOULOS, I.; ROSA, D.; AGUIAR, R.; ARAÚJO, A. de. Dinâmica de serapilheira em uma área de floresta de terra firme, Amazônia Ocidental. *Nativa*, v. 8, n. 3, p. 323–328, 2020.
- FROUFE, L. C. M.; SCHWIDERKE, D.; CASTILHANO, A. C.; CEZAR, R. M.; et al. Nutrient cycling from leaf litter in multistrata successional agroforestry systems and natural regeneration at Brazilian Atlantic Rainforest Biome. *Agroforestry Systems*, v. 94, p. 2321–2334, 2020.
- GALVÃO, E. L.; SILVESTRE, J. V.; CRUZ, J. N.; SILVA, N. C. S. da. Cacau (*Theobroma cacao*): uma visão geral de pesquisas atuais sobre os aspectos botânicos, fitoquímicos e farmacológicos. *Research, Society and Development*, v. 13, n. 5, e8113545810, 2024.
- GARCIA, L. T.; PAULUS, L. A. R.; FERNANDES, S. S. L.; ARCO-VERDE, M. F.; PADOVAN, M. P.; PEREIRA, Z. V. Viabilidade financeira de sistemas agroflorestais biodiversos no Centro-Oeste brasileiro. *Research, Society and Development*, v. 10, 2021.
- GODINHO, T. O.; CALDEIRA, M. V. W.; ROCHA, J. H. T.; CALIMAN, J. P.; TRAZZI, P. A. Quantificação de biomassa e de nutrientes na serapilheira acumulada em trecho de floresta estacional semidecidual submontana, ES. *Cerne*, 2014.
- GONZÁLEZ, N. C.; KROGER, M. The potential of Amazon indigenous agroforestry practices and ontologies for rethinking global forest governance. *Forest Policy and Economics*, v. 118, 2020.
- GUIMARÃES, E. R.; VARGAS, V. H. S.; CASTRO, A. P.; CRUZ, J. F.; VIANNA, A. L. M. Biodiversity and species use in agroforestry systems managed by traditional communities in the Central Amazon. *Revista Árvore*, v. 50, e5005, 2026.
- HÄNSCH, R.; MENDEL, R. R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion in Plant Biology*, v. 12, n. 3, p. 259–266, 2009.
- HEAL, O.W.; ANDERSON J.M.; SWIFT, M.J. Plant litter quality and decomposition: an historical overview. P 3-30. In: CADISH, G.; GILLER, K.E. (Eds.). *Driven by Nature: plant litter quality and decomposition*. Walingford: CAB International, 1997. 409 p
- HEINRICH, V. H. A.; SITCH, S.; ROSAN, T. M.; SILVA-JUNIOR, C. H. L.; ARAGÃO, L. E. O. C. RE—A toolkit for analyzing secondary forest aboveground carbon dynamics in the Brazilian Amazon. *Frontiers in Forests and Global Change*, v. 6, 1230734, 2023.
- HILLMAN, G. R.; GOLDING, D. L. Forest floor characteristics of Marmot and Streeter experimental watersheds, Alberta. Edmonton: Canadian Forestry Service,

Northern Forest Research Centre, 22 p, 1981.

HOLANDA, A. C. de; FELICIANO, A. L. P.; FREIRE, F. J.; SOUSA, F. Q. de; FREIRE, S. R. de O.; ALVES, A. R. Aporte de serapilheira e nutrientes em uma área de Caatinga. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 27, n. 2, p. 621–633, 2017.

HOMMA, A. K. O. Organização da produção e comercialização de produtos agro-florestais: o caso da colônia agrícola nipo-brasileira de Tomé-Açu, Pará. In: VILCAHUAMÁN, L. J. M.; RIBASKI, J.; MACHADO, A. M. B. (Eds.). *Sistemas Agroflorestais e Desenvolvimento com Proteção Ambiental perspectivas, análises e tendências*. 21. ed. Colombo, PR: [s.n.]. p. 51–77.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Acesso em 19 fevereiro de 2025. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/tome-acu/panorama>.

Instituto Nacional de Geografia e Estatística (IBGE). Acesso em 15 de outubro de 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cacau/br>.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Acessado em 04 de fevereiro de 2025. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/>.

ISAAC, M. E.; GAGLIARDI, S.; ORDOÑEZ, J. C.; SAUVADET, M. Shade tree trait diversity and functions in agroforestry systems: a review of which traits matter. *Journal of Applied Ecology*, v. 61, n. 6, p. 1159–1173, 2024.

KALISCHEK, N. et al. Cocoa plantations are associated with deforestation in Côte d'Ivoire and Ghana. *Nature Food*, v. 4, n. 5, p. 384–393, 2023.

KERDRAON, D.; DREWER, J.; CHUNG, A. Y. C.; MAJALAP, N.; SLADE, E. M.; BRÉCHET, L.; WALLWORK, A.; CASTRO-TRUJILLO, B.; SAYER, E. J. Litter inputs, but not litter diversity, maintain soil processes in degraded tropical forests—A cross-continental comparison. *Frontiers in Forests and Global Change*, v. 2, art. 90, 2020.

LIMA, R. P.; FERNANDES, M. M.; FERNANDES, M. R. M.; MATRICARDI, E. A. T. Aporte e decomposição da serapilheira na Caatinga no Sul do Piauí. *Floresta e Ambiente, Seropédica*, v. 22, n. 1, p. 42–49, 2015.

LÔBO, R. L. L.; SIQUEIRA, T. M. V.; MARTINS, E. S.; LIMA, A. S. T.; CUNHA, A. C. M. C. M. Sistemas agroflorestais na recuperação de áreas degradadas. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.7, 2021.

MAIA, R. DA S.; VASCONCELOS, S. S.; CARVALHO, C. J. R. DE. Impactos da remoção de serapilheira sobre a disponibilidade de nitrogênio e carbono orgânico no solo em Floresta Secundária na Amazônia Oriental. *Impacts*. IX Congresso Brasileiro de Agroecologia, v. 10, 2015.

MANRIQUE, A. D.; MANRIQUE MEDINA, A.; VARGAS ORTIZ, L. E. Soil Quality Index in Cocoa Crops. *TEM Journal*, v. 13, n. 1, p. 286–292, 2024.

MARTINS, T. P.; RANIERI, V. E. L. Sistemas agroflorestais como alternativa para as

reservas legais. *Ambiente e Sociedade*, v. 17, n. 3, p. 79–96, 2014.

MELOS, A. R. DE; SATO, A. M.; NETTO, A. L. C. Produção, Armazenamento e Retenção Hídrica da Serrapilheira em Encosta Sob Plantio de híbridos de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*: Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 33, p. 66–73, 2010.

MONROE, P. H. M.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; MARQUES, J. R. B. Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 221, p. 99–108, 2016.

MORFFI-MESTRE, H.; ÁNGELES-PÉREZ, G.; POWERS, J. S.; ANDRADE, J. L.; FELDMAN, R. E.; MAY-PAT, F.; CHI-MAY, F.; DUPUY-RADA, J. M. Leaf litter decomposition rates: influence of successional age, topography and microenvironment on six dominant tree species in a tropical dry forest. *Frontiers in Forests and Global Change*, v. 6, 1082233, 2023.

MUNJEB, N. L.; TIENTCHEU, M. L. A.; PALMER, Y. B. K.; ENANG, R. K. Cocoa-based agroforestry systems and its potential for tree resource conservation around the Dja Biosphere Reserve Southeastern Cameroon. *Journal of Ecology and The Natural Environment*, v. 13, n. 3, p. 73–82, 2021.

NAIR, P. K. R. An introduction to agroforestry. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. 499 p.

NGABA, M. J. Y.; MGELWA, A. S.; GURMESA, G. A.; UWIRAGIYE, Y.; ZHU, F.; QIU, Q.; FANG, Y.; HU, B.; RENNENBERG, H. Meta-analysis unveils differential effects of agroforestry on soil properties in different zonobiomes. *Plant and Soil*, v. 496, p. 589–607, 2024.

NIETHER, W.; ARMENGOT, L.; ANDRES, C.; SCHNEIDER, M.; GEROLD, G. Shade trees and tree pruning alter throughfall and microclimate in cocoa (*Theobroma cacao* L.) production systems. *Annals of Forest Science*, v. 75, n. 38, p. 1–16, 2018.

OLIVEIRA NETO, M. M.; DE NAVEGANTES ALVES, L. F.; SCHWARTZ, G. Agroforestry systems associated with natural regeneration: alternatives practiced by family-farmers of Tomé-Açu, Pará. *Sustentabilidade em Debate*, v. 13, n. 1, p. 286–298, 2022.

PEDROSO JÚNIOR, N. N.; MURRIETA, R. S. S.; ADAMS, C. A agricultura de corte e queima: um sistema em transformação. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, v. 3, n. 2, p. 153–174, ago. 2008.

PENG, Y.; FORNARA, D. A.; WU, Q.; HEDĚNEC, P.; YUAN, J.; YUAN, C.; YUE, K.; WU, F. Global patterns and driving factors of plant litter iron, manganese, zinc, and copper concentrations. *Science of the Total Environment*, v. 857, pt. 3, 159686, 2023.

POLANÍA-HINCAPIÉ, K. L., OLAYA-MONTES, A.; CHERUBIN, M. R.; HERRERA-VALENCIA, W.; ORTIZ-MOREA, F. A.; SILVA-OLAYA, A. M. Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. *Geoderma*, v. 386, 114900, 2021.

PRESCOTT, C. E. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? *Biogeochemistry*, v. 101, n. 1–3, p. 133–149, 2010.

QUEIROZ, J. F.; MANESCHY, R.; FILGUEIRAS, G. C.; HOMMA, A. K. 2020. Indicadores de viabilidade econômica para sistemas agroflorestais pecuários no Sudeste do Pará. *Revista do núcleo de meio Ambiente da UFPA*. V.5, n. 1 2020.

QUESADA, C. A.; LLOYD, J.; ANDERSON, L. O.; FYLLAS, N. M.; SCHWARZ, M.; CZIMCZIK, C. I. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. *Biogeosciences*, v. 8, n. 6, p. 1415–1440, 2011.

R Core Team (2025). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, v. 4.4.3, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

REGO, A. K. C.; KATO, O. R. Agricultura de corte e queima e alternativas agroecológicas na Amazônia. *Novos Cadernos NAEA*, Belém, v. 20, n. 3, p. 203–224, 2017.

REYES, H. A.; FERREIRA, P. F. A.; SILVA, L. C.; COSTA, M. G.; NOBRE, C. P.; GEHRING, C. Arbuscular mycorrhizal fungi along secondary forest succession at the eastern periphery of Amazonia: Seasonal variability and impacts of soil fertility. *Applied Soil Ecology*, v. 136, n. August 2018, p. 1–10, 2019.

RIBASKI, J.; MONTOYA, L. J.; RODIGHERI, H. R. Sistemas agroflorestais: aspectos ambientais e socioeconômicos. *Informe Agropecuário*, v. 22, n. 212, p. 61–67, 2001.

RIVEST, D.; LORENTE, M.; OLIVIER, A.; MESSIER, C. Soil biochemical properties and microbial resilience in agroforestry systems: Effects on wheat growth under controlled drought and flooding conditions. *Science of the Total Environment*, v. 463–464, p. 51–60, 2013.

RODRIGUES, T. E.; SANTOS, P. L. dos; ROLLIM, P. A. M.; SANTOS, E.; REGO, R. S.; SILVA, J. M. L.; VALENTE, M. A.; GAMA, J. R. N. Caracterização e classificação dos solos do Município de Tomé-Açu, PA. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2001. 49 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 117).

SADEGHI, S.; PETERMANN, B. J.; STEFFAN, J. J.; BREVIK, E. C.; GEDEON, C. Predicting microbial responses to changes in soil physical and chemical properties under different land management. *Applied Soil Ecology*, v. 188, 104878, 2023.

SANTOS, A. F. A.; CARNEIRO, A. C. P.; MARTINEZ, D. T.; CALDEIRA, S. F. Capacidade de retenção hídrica do estoque de serapilheira de eucalipto. *Floresta e Ambiente*, v. 24, e20150303, 2017.

SARI, R. R.; ROZENDAAL, D. M. A.; SAPUTRA, D. D.; HAIRIAH, K.; ROSHETKO, J. M.; VAN NOORDWIJK, M. Balancing litterfall and decomposition in cacao agroforestry systems. *Plant and Soil*, v. 473, p. 251–271, 2022.

SAUVADET, M.; SAJ, S.; FRESCHET, G. T.; ESSOBO, J.-D.; ENOCK, S.; BECQUER, T.; TIXIER, P.; HARMAND, J.-M. Cocoa agroforest multifunctionality

and soil fertility explained by shade tree litter traits. *Journal of Applied Ecology*, v. 57, n. 3, p. 476–487, 2020.

SENAR – Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. *Sistemas Agroflorestais (SAFs): conceitos e práticas para implantação no bioma amazônico/Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR)*. — 1. ed. Brasília: 140 p. il. SENAR, 2017.

SILVA, K. A., MARTINS, S. V., MIRANDA, A. N., LOPES, A. T. Estoque de serapilheira em uma floresta em processo de restauração após mineração de bauxita. *Rodriguésia*, 69(2), 853–861, 2018.

SOUZA, F. E. D.; OLIVEIRA, J. N. S.; SANTOS, C. R. C.; FERREIRA, E. V.O.; SILVA, R. T. L.; PAULA, M. T.; ALVES, J. D. N.; OLIVEIRA, J. S. R.; RODRIGUES, J. I. M.; MARTINS, W. B. R. Physical and chemical soil quality and litter stock in agroforestry systems in the Eastern Amazonia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 382, art. 109479, 2025.

SUÁREZ, L. R.; SALAZAR, J. C. S.; CASANOVES, F.; BIENG, M. A. N. Cacao agroforestry systems improve soil fertility: Comparison of soil properties between forest, cacao agroforestry systems, and pasture in the Colombian Amazon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 314, 107349, 2021.

TORRES, C. M. M. E.; JACOVINE, L. A. G.; OLIVEIRA, S. N. N.; BRIANEZI, D.; ALVES, E. B. B. M. Sistemas agroflorestais no Brasil: uma abordagem sobre a estocagem de carbono. *Pesq. flor. bras.*, Colombo, v. 34, n. 79, p. 235-244, jul./set. 2014.

VILELA, E. F.; CALLEGARO, G. M.; FERNANDES, G. W. *BIOMAS E AGRICULTURA Oportunidades e Desafios*. 2019.

VOIGT, V. P.; WALSH, R. P. D. Hidrologische prozesse in bodenstreu. *Schriften des Naturwissenschaftlichen Vereins für Schleswig-Holstein*, 46: 35-54, 1976.

WARTENBERG, A. C.; BLASER, W. J.; GATTINGER, A.; ROSHETKO, J. M.; VAN NOORDWIJK, M.; SIX, J. Does shade tree diversity increase soil fertility in cocoa plantations? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 248, p. 190–199, 2017.

WONG, M. Y.; NEILL, C.; MARINO, R.; SILVÉRIO, D.; HOWARTH, R. W. Molybdenum, phosphorus, and pH do not constrain nitrogen fixation in a tropical forest in the southeastern Amazon. *Ecology*, v. 102, n. 1, e03211, 2021.

XIA, L.; SONG, X.; FU, N.; CUI, S.; LI, L.; LI, H.; LI, Y. Effects of forest litter cover on hydrological response of hillslopes in the Loess Plateau of China. *Catena*, v. 181, art. 104076, 2019.